

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
Бубеев Ю.А., д.м.н., профессор
Буравкова Л.Б., д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН
Бухтияров И.В., д.м.н., профессор, академик РАН
Виноградова О.Л., д.б.н., профессор – заместитель главного редактора
Дьяченко А.И., д.т.н., профессор
Ерофеева Л.М., д.б.н., профессор
Иванов И.В., д.м.н., профессор
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
Сорокин О.Г., к.м.н. – ответственный секретарь
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.
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)

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, 2024
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2024

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, размещены на сайте журнала journal.imbp.ru
Полные тексты статей доступны в базе данных РИНЦ (www.elibrary.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
Секретарь: Муромцева Т.С., тел.: 8 (499) 195-65-12, эл. почта: arhiv@imbp.ru

Сдано в набор 05.02.2024
Подписано в печать 02.2024
Формат 60 × 84 1/8
Гарнитура Tahoma
Печать офсетная
Усл. печ. л. 15,11
Тираж 150 экз
Заказ № ...

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»
Адрес: 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 11/5

Содержание

Contents

Обзоры

Reviews

Бубеев Ю.А., Сыркин Л.Д., Поляков А.В., Усов В.М., Карпов А.А., Иванов А.В. Применение телеконсультаций для оценки личностного адаптационного потенциала и выявления показаний к оказанию квалифицированной психологической помощи работникам в удаленных регионах РФ

5

Bubeev Yu.A., Syrkin L.D., Polyakov A.V., Usov V.M., Karpov A.A., Ivanov A.V. Practice of teleconsultation for evaluation of personal adaptation potential and detection of indications for providing qualified psychological services to employees in remote regions of Russia

Кузичкин Д.С., Маркин А.А., Журавлева О.А., Кочергин А.Ю., Ничипорук И.А. Система гемокоагуляции в наземных экспериментах, моделирующих эффекты космического полета: по материалам российских исследований

17

Kuzichkin D.S., Markin A.A., Zhuravleva O.A., Kocherguin A.Yu., Nichiporuk I.A. Hemocoagulation system in ground experiments simulating the effects of space flight: based on russian research materials

Русанов В.Б., Яхья Ю.Д., Орлов О.И. Вариабельность сердечного ритма как маркер регуляторных механизмов сердечно-сосудистого гомеостаза в космическом полете

25

Rusanov V.B., Yakhya Yu.D., Orlov O.I. Heart rate variability as a marker of regulatory mechanisms of cardiovascular homeostasis in space flight

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Иванов И.В., Бурмистров В.И., Маткевич Е.И. Анализ возможных уровней облучения космонавтов при краткосрочной лунной миссии

32

Ivanov I.V., Burmistrov V.I., Matkevich E.I. Analysis of probable radiation levels to cosmonauts in a short-term lunar mission

Дунаев А.В., Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Федорович А.А., Сидоров В.В., Васин А.В., Дубинин В.И. Исследование микроциркуляции крови в условиях невесомости с помощью портативных лазерных доплеровских флоуметров

47

Dunaev A.V., Loktionova Yu.I., Zharkikh E.V., Fedorovich A.A., Sidorov V.V., Vasin A.V., Dubinin V.I. Investigation of blood microcirculation in microgravity with the use of portable laser doppler flowmeters

Украинцева Ю.В., Журина Ю.Д., Лазарев И.Е., Томиловская Е.С. Сравнение изменений ЭЭГ покоя в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии и 21-суточной антиортостатической гипокинезии

55

Ukrainitseva Yu.V., Zhurina Yu.D., Lazarev I.E., Tomilovskaya E.S. Comparison of eeg changes at rest during 21-day dry immersion and 21-day head-down bed rest

Журавлева Т.В., Логинов В.И. Психологические особенности адаптации организма здорового человека к моделируемым факторам космического полета в эксперименте с 21-суточной «сухой» иммерсией

62

Zhuravleva T.V., Loguinov V.I. Psychological aspects of adaptation of the healthy human organism to simulated spaceflight factors in an experiment with 21-day dry immersion

- Кузнецова П.Г., Коротаев К.С., Лебедева С.А., Швед Д.М., Савинкина А.О., Гушин В.И., Ильин Е.А. Исследование психической работоспособности и групповой динамики в автономных условиях зимовки на станции «Восток» **68**
- Kuznetsova P.G., Korotaev K.S., Lebedeva S.A., Shved D.M., Savinkina A.O., Gushchin V.I., Ilyin E.A. Investigation of psychic performance and group dynamics in the autonomous conditions of wintering on station «Vostok»
- Шульгина С.М., Рыкова М.П., Кутько О.В., Шмаров В.А., Антропова Е.Н., Жирова Э.А., Орлова К.Д., Садова А.А., Власова Д.Д., Пономарев С.А. Влияние краткосрочной изоляции в гермообъекте малого объема на субклиническую реактивацию латентных патогенов человека вирусной и бактериальной природы **80**
- Shulguina S.M., Rykova M.P., Kutko O.V., Shmarov V.A., Antropova E.N., Zhirova E.A., Orlova K.D., Sadova A.A., Vlasova D.D., Ponomarev S.A. Effect of short-term isolation and confinement in a small chamber on subclinical reactivation of latent viral and bacterial pathogens in humans
- Миллер Н.В., Зобова Л.Н., Рошин В.Ю., Бадакв А.М. Методика контрольного тестирования при исследовании влияния «сухой» иммерсии на параметры выполнения зрительно-моторной задачи **88**
- Miller N.V., Zobova L.N., Roshchin V.Yu., Badakva A.M. Procedure of check testing in the process of studying the effects of dry immersion on characteristics of performing a motor-ocular task
- Ильин В.К., Соловьёва З.О., Носовский А.М., Рыкова М.П., Шеблаева А.С., Шеблаев М.В., Ловцевич С.М., Краева Л.А., Гизингер О.А. Исследование влияния профилактического приема аутопробиотика на основе *Streptococcus salivarius* на состояние микробиоты полости рта у участников изоляционного эксперимента SIRIUS-2021 **94**
- Ilyin V.K., Solovieva Z.O., Nosovsky A.M., Rykova M.P., Sheblaeva A.S., Sheblaev M.V., Lovtsevich S.M., Kraeva L.A., Guizinger O.A. Investigation of the effect of prophylactic consumption of a streptococcus salivarius-based autoprobiotic on oral microbiota of participants in isolation study «SIRIUS-2021»
- Самойленко Т.В., Шишкина В.В., Антакова Л.Н., Горюшкина Е.С., Атякшин Д.А. Актин гладкомышечных клеток как критерий гравичувствительности желудочно-кишечного тракта мышей и монгольских песчанок **102**
- Samoilenko T.V., Shishkina V.V., Antakova L.N., Goryushkina E.S., Atiakshin D.A. Actin of smooth muscle cells as a criterion of gravity-sensitivity of the gastrointestinal tract of mice and mongolian gerbils

Методики

Methods

- Орлов О.И., Мамонова Е.Ю., Переведенцев О.В. Использование матричного метода для оценки системы медицинского обеспечения работников промышленных предприятий нефтяной компании **111**
- Orlov O.I., Mamonova E.Yu., Perevedentsev O.V. Using the matrix method for assessing the incidence and medical support efficiency of industrial workers in large oil companies
- Котов А.Н., Катунцев В.П., Сухоставцева Т.В., Баранов В.М. К вопросу об оценке ортостатической устойчивости организма человека **118**
- Kotov A.N., Katuntsev V.P., Sukhostavtseva T.V., Baranov V.M. On the assessment of human body orthostatic tolerance

ОБЗОРЫ

УДК 159.944+613.64+614.2+612.2+004.9+004.032.26

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛЕКОНСУЛЬТАЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛИЧНОСТНОГО АДАПТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА И ВЫЯВЛЕНИЯ ПОКАЗАНИЙ К ОКАЗАНИЮ КВАЛИФИЦИРОВАННОЙ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ПОМОЩИ РАБОТНИКАМ В УДАЛЕННЫХ РЕГИОНАХ РФ

Бубеев Ю.А.¹, Сыркин Л.Д.², Поляков А.В.¹, Усов В.М.¹, Карпов А.А.³, Иванов А.В.¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)

³Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

E-mail: khoper.1946@gmail.com

Рассмотрены особенности психологического телеконсультирования (ПТК) в условиях удаленных районов России с учетом современных взглядов, методических подходов и практических методов оценки личностного адаптационного потенциала у лиц с нарушениями психического здоровья.

Раннее выявление рисков психического здоровья работников трудоспособного возраста базируется на представлениях о высокой значимости сохранности личностного адаптационного потенциала и психической адаптации для успешного преодоления трудностей психосоциальной адаптации. Повышению качества ПТК способствует распознавание эмоционального реагирования обследуемого для получения обратной связи о его психическом состоянии.

Анализ оказания консультативной помощи лицам с проблемами психической адаптации (по опыту дистанционной поддержки населения при COVID-19) показал перспективность ПТК в удаленных районах России для реализации персонализированного диагностического подхода. ПТК позволяет реализовать методы интерактивного получения объективных данных о резервах психической адаптации с учетом эмоционального реагирования обследуемого лица, способствует индивидуальному подбору профилактических, оздоровительных и лечебных мероприятий в условиях первичного звена здравоохранения.

Для выявления лиц со снижением резервов психической адаптации в первичном звене здравоохранения перспективно использовать оценку личностного адаптационного потенциала. На основе искусственных нейросетей, обученных с помощью корпусов данных (Datasets), представляется возможным выполнять автоматическое распознавание эмоций для улучшения условий ПТК.

Ключевые слова: удаленные регионы, психологическая помощь населению, резервы психической адаптации, личностный адаптационный потенциал, психологическое дистанционное консультирование.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 5–16.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-5-16

Вопросы предоставления квалифицированной психологической помощи населению России привлекают внимание общественности и профессионального сообщества ввиду необходимости преодоления последствий негативных психосоциальных проблем, которые нарушают нормальную жизнедеятельность и снижают качество жизни трудоспособного населения страны. Особенно важно обеспечить поддержание психологического благополучия работников напряженных видов труда и контингентов лиц опасных профессий при выявлении у них личностных проблем, трудностей социализации, психологического и/или физического перенапряжения, переутомления, напряженной работы, информационных перегрузок или их дефицита и др. Совокупность отмеченных обстоятельств стимулирует усилия по созданию методологии и информационных ресурсов для дистанционного консультирования лиц, у которых выявляются риски нарушений психического здоровья. В числе приоритетов привлечения консультантов психологического (при необходимости и психоневрологического) профиля рассматривается поддержка принятия врачами первичного звена решения о неотложных показаниях к врачебному вмешательству и госпитализации пациентов с симптомами психической дезадаптации, у которых проявляется значимое снижение работоспособности, сопровождающееся сложной картиной нервно-психических расстройств различной степени выраженности.

По мере реализации государственной программы цифровизации отечественной медицины возрастает актуальность совершенствования системы медицинского обеспечения работников трудоспособного

возраста в удаленных районах (УР). Анализ современной литературы показывает неослабевающий интерес к технологиям дистанционного здравоохранения, предназначение которых – расширить доступ всех слоев населения к получению медицинской помощи в УР с учетом ограниченных возможностей медицинской транспортировки и эвакуации, недостаточной развитости сети медицинских учреждений, а также нехватки специалистов ряда специальностей [1–6].

Особый вид медицинских услуг связан с достижениями в области телемедицины. Следуя источнику [2], будем далее принимать, что одной из основных задач телемедицины является предоставлении консультационно-диагностической медицинской услуги, при которой пациент или врач, непосредственно проводящий обследование или лечение пациента, получают дистанционную консультацию другого специалиста, используя современные информационно-коммуникационные технологии. В целом эту формулировку можно отнести к ситуации оказания психологических услуг, хотя нормативно-законодательная сторона этого процесса до настоящего времени не отработана в полной мере по разделу психологической помощи населению страны.

Взаимодействие участников ПТК базируется на закономерностях «субъект – субъектных отношений» (в форме диалога «консультант – лечащий врач», «консультант – пациент», «психолог – член семьи пациента» и др.), опосредованной компьютерной поддержкой. Признак интерактивности ведения диагностического процесса составляет одну из значимых особенностей ПТК и является определяющим для качественного оказания психологической помощи.

В значительном числе публикаций речь идет о режимах телемедицины, обеспеченных в реальном масштабе времени видеоконференцсвязью, и в этом случае такое направление телемедицины принято также называть «телеконсультации в режиме реального времени» или «синхронные консультации» [3]. Именно такой вид наиболее перспективен для организации ПТК для лиц со сниженными резервами психической адаптации. При этом, следуя обзору [4], принимается посылка методического характера, уточняющая вышеприведенные определения телемедицинских услуг при ПТК как вида инновационного мероприятия на удалении, которое направленно на осознание/понимание и разрешение имеющихся у субъекта труда проблем и затруднений в сфере профессиональной реализации с учетом условий внешней среды и социального окружения.

Существенно, что ПТК предполагает персонифицированный подход к интерактивной коммуникации в системе «врач – врач – пациент» для изучения поведенческих особенностей, личностного адаптационного потенциала и ценностных установок на

сохранение профессионального здоровья и профессиональной пригодности и включает, в числе прочего, контроль его психического статуса за счет автоматических методов распознавания эмоционального реагирования.

Отмеченные обстоятельства побуждают обратиться к поиску успешных прецедентов дистанционных ПТК и новых организационно-тактических решений взаимодействия врачей первичного звена с экспертами-консультантами из учреждений высокотехнологичной специализированной помощи.

Один из главных организационно-тактических вопросов состоит в разработке рекомендаций врачам первичного звена о составе контингента прикрепленных к медицинскому обслуживанию работников, у которых выявляются показания проведения мониторинга психического здоровья. Что касается выбора приоритетов к проведению ПТК и классификации пациентов, обращающихся за получением психологической и психиатрической помощи, то конструктивные предложения к разделению потока пациентов на уровни мониторинга можно найти в работе [5], в которой предложено при формировании первоочередности принимать во внимание тяжесть состояния, распространение конкретного вида нарушений в когорте работников и риски неблагоприятных исходов, что способствует максимальному охвату нуждающихся в помощи с учетом специализации прикрепленной к ведению ПТК экспертной группы. С этих позиций можно отметить как успешный прецедент применения ПТК для лиц с психоэмоциональными нарушениями и снижением работоспособности при COVID-19 [7, 8].

Применение психодиагностических методов выявления личностного адаптационного потенциала

На ранних стадиях диагностики дезадаптационных расстройств одним из приоритетных направлений является изучение состояния механизмов психической регуляции в стрессирующих условиях жизнедеятельности. Такая постановка диагностической задачи переводит проблему прогноза риска неблагоприятной динамики в психологическую плоскость оценивания личностных особенностей, социального окружения, ценностных ориентаций индивида [9].

По мнению автора работы [10], проблема личностного потенциала лежит в русле изучения психологических факторов и механизмов динамической устойчивости и эффективности деятельности личности в изменяющемся мире.

В работе [11] личностный потенциал определяется как «самоуправляемая система внутренних возобновляемых ресурсов, которые проявляются в деятельности, направленной на получение социально значимых результатов» [11].

Категория личностного потенциала и ресурсов профессиональной надежности специалистов находит отражение в работах о личностном и профессиональном становлении специалистов разного профиля, включая авиационных специалистов. При этом диагностика личностного потенциала летчика, в частности, предполагает использование разнообразных методических комплексов, включающих тесты интеллектуальных профессионально важных качеств, личностных особенностей, профессиональной направленности и мотивации и др. [12–14].

В более общей формулировке личностный потенциал, по мнению автора работы [15], «...определяет способность человека к решению трудных ситуаций». Из этого исследования следует, что одна из главных задач распознавания адаптационного потенциала личности – анализ «способности личности исходить из устойчивых внутренних критериев и ориентиров в своей жизнедеятельности и сохранять стабильность деятельности и смысловых ориентаций на фоне давлений и изменяющихся внешних условий». Потенциал в структуре личности, согласно работе [16], «...предстает как индивидуальная система внутренних и внешних ресурсов отдельного человека, обеспечивающих многообразие возможных векторов развития и трансформации личности в процессе ее жизненного пути».

Применительно к профессиональной когорте авиационных специалистов, по мнению авиационных психологов [17], содержательная сторона личностного потенциала летчика характеризуется прежде всего такими категориями, как профессиональное здоровье, степень физиологической, психологической и социальной активности, совокупность личностных качеств и др., а также уровень духовно-нравственного развития личности.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что личностный потенциал в первую очередь отражает меру преодоления личностью заданных обстоятельств, но одновременно, согласно цитированным работам, его можно рассматривать как фактор успешности в реализации личных планов, планов профессионального развития и самоопределения в целом.

Для исследования характеристик, определяющих устойчивость человека к воздействию напряженных условий деятельности, сохранность его психического здоровья и личностного благополучия, имеются различные методические подходы, включающие использование психологических тестов различной степени автоматизации [9, 18, 19]. В работе [20] акцентируется внимание на изучение психологических ресурсов личности, среди которых названы психологическая защита, копинг-поведение, адаптивность, личностный потенциал и др. Выбор консультантом конкретного состава методик для оценки в ходе ПТК индивидуальной адаптации к условиям жизнедеятельности должен определяться

критериями обеспечения надежности деятельности и сохранности здоровья человека.

Использование психологического инструментария при ПТК предполагает его соответствие ряду требований. На основе представленных в цитированных выше источниках методических разработок можно сформулировать некоторые общие требования применительно к ПТК.

В частности, эти инструменты должны:

- помогать врачам первичного звена здравоохранения в составлении индивидуального профиля факторов рисков для лиц со стойким снижением работоспособности;

- позволять специалистам при вынесении заключений опираться на упорядоченный сбор данных о негативном влиянии профессионального, социального и экологического стресса на показатели успешности и надежности выполнения трудовых задач, а также о наличии риск-факторов для здоровья и личностного благополучия лиц, проходящих обследование по поводу прогрессирующего снижения работоспособности;

- позволять выявить наиболее опасные психические нарушения для оптимального функционирования механизмов регуляции деятельности, в частности, протекающие по типу когнитивного дефицита и снижения стресс-устойчивости (в том числе в форме синдрома эмоционального выгорания).

В качестве предмета изучения социально-психологической адаптации целый ряд авторов предлагает использовать при анализе личностного потенциала интегративное психологическое свойство личности, определяемое как «жизнестойкость» [20–26]. Направление исследований жизнестойкости личности предполагает получение ответов на вопросы, за счет каких механизмов психической саморегуляции и психической адаптации человеку сложной профессии удастся совладать с экстремальными жизненными ситуациями, какими резервами и ресурсами он обладает [20, 27].

В работе [28] адаптационные способности человека раскрываются через оценку уровня развития психологических характеристик, наиболее значимых для регуляции психической деятельности и самого процесса адаптации. Из цитируемой публикации следует, что чем выше уровень развития таких характеристик, тем выше вероятность успешной адаптации человека и тем значительнее диапазон факторов внешней среды, к которым он может приспособиться.

Личностный адаптационный потенциал, согласно работе [28], включает следующие характеристики:

- нервно-психическую устойчивость, уровень развития которой обеспечивает толерантность к стрессу;

- самооценку личности, являющуюся ядром саморегуляции и определяющую степень

адекватности восприятия условий деятельности и своих возможностей;

- ощущение социальной поддержки, обуславливающее чувство собственной значимости для окружающих;

- уровень конфликтности личности;

- опыт социального общения.

Перечисленные характеристики расцениваются как значимые при оценке и прогнозе успешности адаптации к трудным и экстремальным ситуациям, также при оценке скорости восстановления психического равновесия [28].

Резюмируя вышеуказанное, можно принять формулировку, представленную в работе [29], согласно которой под личностным потенциалом понимается «интегральная системная черта индивидуально-психологических особенностей личности, проявляющаяся в способности личности, исходя из личностных ориентиров и критериев, сохранять стабильность деятельности и смысловых ориентаций на фоне давлений и изменяющихся внешних условий».

Для изучения динамики психического состояния предложены батареи тестов, позволяющих установить соответствие личностного адаптационного потенциала требованиям динамично меняющихся условий окружающей среды [18, 29, 30].

В их числе фигурируют многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» [31], опросник «Оценка психической активации, интереса, эмоционального тонуса, напряжения и комфортности» [32], симптоматический опросник «Самочувствие в экстремальных условиях» [33], ситуационный вариант шкалы «Субъективная витальность» [34] и др. Представленный перечень свидетельствует о наличии апробированного на практике инструментария получения оценок адекватности реагирования обследуемого на усложнение ситуации [35, 36].

В числе средств психодиагностики, предназначенных для описания психических детерминант приспособительных возможностей человека в трудных ситуациях, важное место отводится психосемантическому направлению изучения ценностных компонент психической регуляции поведения и деятельности человека, подверженного стрессирующим условиям среды [37–40].

Также для применения в целях психодиагностики тестов и опросников называются следующие [41–44]:

- 1) шкала САН для оценивания комплекса «Самочувствие – Активность – Настроение»;

- 2) многомерный опросник на утомляемость MFI – для оценивания ряда показателей, включая общую усталость, физическую и умственную утомляемость, снижение мотивации и активности;

- 3) опросник для диагностики психологической дезадаптации О.Н. Родиной;

- 4) многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» А.Г. Маклакова и С.В. Чермянина.

В том случае, если в ходе ПТК выявляются признаки возможного перехода от стадии компенсации к прогрессирующим расстройствам психической регуляции, психолог-консультант может рекомендовать дополнительные обследования обратившегося за консультацией пациента для уточнения степени декомпенсации психических ресурсов адаптации, сопровождающихся проявлениями выраженного снижения личностного адаптационного потенциала. Именно такой путь представляется наиболее предпочтительным для принятия решения в первичном звене здравоохранения о наличии показаний к госпитальному обследованию и последующей реабилитации.

Дистанционное медицинское и психологическое телеконсультирование как новая форма инновационной практики цифровой медицины

Как отмечалось выше, известные трудности с комплектованием сил и средств первичного звена здравоохранения и частая удаленность от специализированных медицинских учреждений закономерно приводят к идее использования информационных технологий, в частности, телемедицины для работы квалифицированных специалистов с пациентами в режиме удаленного доступа [45].

С точки зрения оценки перспектив развития цифровых технологий в отечественной медицине следует учитывать, что на сегодняшний день в число преимуществ телемедицины вошли улучшение доступа к медицинской помощи, расширение ее объемов и снижение стоимости, а самое главное, большие возможности для сбора массива разнообразной информации, которые ранее не поддавались оперативному анализу [46, 47].

Эти результаты свидетельствуют о возможности существенно расширить рамки применения цифровых медицинских технологий, хотя на сегодня не преодолены в полном объеме трудности, связанные со спецификой получения исходных данных и принятия оперативных решений непосредственно в сеансе коммуникации. В частности, проблемы пользователей удаленного консультирования связаны с межперсональным общением, когда отсутствие «живого контакта» пациента с врачом создает ощущение ограниченности обратной связи [48]. Это обстоятельство стимулирует поиски информационных технологий, которые позволяют предоставить консультанту данные о проявлении эмоций у пациента на основе данных, оперативно получаемых по каналу обратной связи [49, 50].

Для оценки эмоциональных реакций по результатам наблюдений за действиями и внешними проявлениями поведения участников коммуникации применяются методы анализа выражения лица



Рисунок. Этапы распознавания состояний обследуемого в сеансе телекоммуникации на примере обработки аудио- и видеоданных (из работы [66])

(анализ мимики), разговорной речи, движения глаз (Eye Tracking) и др., т. е. весь доступный состав мультимодальных данных для контроля поведенческой активности участников коммуникативного взаимодействия [51].

Большое внимание исследователей в области информатики и психологии уделяется распознаванию эмоций человека по выражению его лица [52, 53].

Эти прикладные задачи представляют практический интерес по ряду причин:

1) видеоизображения достаточно просто получить, используя коммерчески доступное периферийное оборудование компьютеров и/или носимые устройства;

2) современными методами из исходных данных удается извлечь достаточно много признаков для распознавания эмоций;

3) имеется обширная база данных для построения алгоритмов распознавания эмоций – интерес многих разработчиков искусственных нейросетей (ИНС) к теме позволил за сравнительно короткий период времени сформировать достаточное число наборов данных (изображений лиц), организованных в так называемые базы данных или корпуса (англ. Datasets), на основании которых тестируются точность и надежность цифровых моделей распознавания.

Отметим также, что разрешающая способность вычислительных алгоритмов возрастает по мере формирования обширных общедоступных баз данных и массива публикаций результатов тестирования разных конфигураций ИНС. В целом распознавание эмоций человека по мимике его лица является важной научно-исследовательской проблемой, которая охватывает многие научные области и дисциплины, такие как компьютерное зрение, искусственный интеллект и др., включая разделы медицины и психологии [53–56].

Важно отметить и такие часто используемые источники данных для распознавания эмоции, как звуковой поток и устная речь, методам анализа которых посвящены работы [57–59].

Для акустического анализа аудиозаписей речи может использоваться компьютерная программа

Praat, которая позволяет оценивать основные акустические характеристики речевого аудиосигнала: частота основного тона (ЧОТ), форманты, интенсивность сигнала (громкость), число голосовых импульсов, число ноль-пересечений, вариативность речевого сигнала по амплитуде и частоте и др. [60].

В работах [61, 62] показано, что выходные численные характеристики приложения Praat позволяют осуществлять контроль изменения функционального состояния человека, степень психофизиологической напряженности говорящего.

Большое число предлагаемых подходов, процитированных в данном обзоре, приводит к вопросу о рациональном облике системы компьютерной поддержки, в которой были бы представлены необходимые компоненты для ПТК.

В настоящее время известны отечественные разработки, которые демонстрируют способы информационной поддержки ПТК с оперативной оценкой эмоционального реагирования обследуемого с применением автоматизированных инструментов на базе нейросетевых методов и специализированных корпусов данных [54, 63–66].

Наиболее информативными модальностями для анализа эмоциональных реакций являются видео- и аудиоданные. Общую схему получения информативных признаков в сеансе телекоммуникации с помощью систем распознавания эмоций по аудио- и видеопотоку, следуя работе [66], можно представить на рисунке.

По результатам анализа ранее выполненных разработок можно констатировать, что программная система для автоматизированного оценивания психоэмоционального состояния человека может быть реализована с использованием стандартного аппаратного обеспечения (веб-камера с направленным микрофоном или смартфон) на основе программных технологий визуального анализа мимики лица [63], жестикуляции [64] при использовании каналов связи, пропускная способность которых позволяет получить видеоизображение лица обследуемого пациента надлежащего качества, голосовых характеристик [65], а также другой мультимодальной информации [66]. В иных случаях для

реализации целей удаленной консультации предлагается использовать аудиоинформацию в качестве основного источника данных о состоянии обследуемого, но при этом предусмотреть возможность записи в стационарных условиях видеофрагментов (с временной привязкой и паспортизацией данных в оговоренных протоколом психологического обследования объеме) с последующей их пересылкой консультанту для автоматического анализа.

Разработка на базе перечисленных программно-информационных компонент системы оперативной оценки психоэмоционального состояния человека является одним из условий эффективного проведения ПТК в УР. От ее внедрения зависит улучшение канала обратной связи при удаленной коммуникации респондентов.

В представленном обзоре на основе анализа публикаций по вопросам снижения работоспособности лиц трудоспособного возраста в УР, часто сопровождающегося проявлениями расстройств психической адаптации (в форме астенизации, когнитивного дефицита, повышенной нервно-эмоциональной лабильности и депрессивного настроения и др.), показана необходимость активного привлечения специалистов-психологов к оценке личностного адаптационного потенциала и перспективность в этом отношении технологий ПТК в помощь врачам первичного звена здравоохранения.

Это направление, ориентированное на разрешение имеющихся у субъекта труда проблем и затруднений в сфере профессиональной реализации и социальной адаптации с учетом условий внешней среды, призвано дополнить объем предоставляемой медицинской и психологической помощи на местах за счет ресурсов специализированных медицинских центров, а также обеспечить своевременное принятие решения в первичном звене здравоохранения о необходимости проведения госпитального обследования и реабилитации. В целом сегодня правомерно говорить о новых возможностях психосоциальной поддержки населения на основе использования технологий телемедицины для охраны психического здоровья в удаленных местностях с помощью дистанционных консультаций специалистов высокой квалификации, применяющих современные методы и методики интерактивного обследования, чем задается новый стандарт общения с пациентом, способствующий преодолению дефицита медицинского обслуживания и психологической помощи населению всех регионов страны. Этот стандарт в настоящее время активно обсуждается научной общественностью на этапе подготовки федерального законопроекта об оказании психологической помощи населению Российской Федерации [67].

В данном обзоре разделяется позиция разработчиков упомянутого законопроекта о том, что психологическое консультирование – это вид

психологической помощи, реализуемый через мероприятие или комплекс мероприятий, направленных на осознание/понимание и разрешение имеющихся у объекта (физическое лицо, юридическое лицо, группа лиц) проблем и затруднений психологического характера. При этом необходимо принимать во внимание различия по целям и решаемым задачам при разных видах психологической помощи: в отличие от врачебной психотерапевтической деятельности, осуществляемой при непосредственном (очном) контакте врача с пациентом и направленной на купирование болезненных симптомов (собственно на терапию заболеваний, как правило, имеющих психогенную природу и психосоматический генез), в ходе дистанционных психологических консультаций позитивный эффект психологической помощи в значительной степени достигается посредством активации внутренних ресурсов, а повышение жизнестойкости индивида достигается путем преодоления психологических затруднений и обретения личностных смыслов.

Представленная в обзоре позиция авторов и выбор базовой теоретической платформы в значительной степени формировались под влиянием результатов плодотворной деятельности большой плеяды исследователей авиакосмической медицины и космической психологии, усилия которых, начиная с самых первых космических полетов, были направлены на создание теоретико-методологических основ психофизиологии и психологии экстремальных условий жизнедеятельности и дистанционной медико-психологической поддержки экипажей в пилотируемых космических полетах [68–70]. Первоочередного внимания в этом плане заслуживают исследования [68, 69], подтверждающие правомерность использования дистанционных методов распознавания психоэмоционального состояния человека, в частности, признаков психоэмоционального напряжения.

Результаты, полученные в практике обеспечения пилотируемых космических полетов и при решении задач гармонизации не только психического состояния человека в экстремальных условиях жизнедеятельности, но и межличностных отношений членов экипажа в малой рабочей группе, во многом предвосхитили многие сегодняшние подходы психодиагностики и психопрофилактики с использованием технологий телемедицины. В контексте обсуждаемого подхода можно отметить позитивный опыт практического применения автоматизированного анализа видеозаписей членов космического экипажа во время их общения с операторами наземных служб [55], а также использования таких источников данных для распознавания эмоций космонавтов, как звуковой поток и устная речь.

Перспективы практического применения результатов акустического анализа речи могут

заключаться не только в создании более совершенных методов мониторинга функционального состояния человека-оператора, но и во включении их как элемента дистанционного сопровождения автономного режима функционирования малой группы, что на данном этапе развития медико-психологических исследований обеспечило формирование устойчивой тенденции развития дистанционных технологий [62, 70].

Усилению такой тенденции в нашей стране способствует заявленный курс на цифровизацию в медицинское и социальное обеспечение населения. Современный уровень информационного и аппаратно-программного оснащения уже сейчас достаточно высок во многих областях высокотехнологичной медицины. Большинство современных медицинских учреждений имеют необходимую инфраструктуру для организации ПТК в форме видеоконференцсвязи.

Выводы

1. Вопросы активного ведения лиц из группы риска нарушений психического здоровья настоятельно требуют совершенствования врачебной тактики в первичном звене здравоохранения в интересах активного предупреждения негативного (преморбидного) перехода и дальнейших осложнений в случае выявления длительно протекающих явлений утомления, снижения работоспособности, негативных психоэмоциональных сдвигов.

2. Возможность своевременного выявления снижения личностного адаптационного потенциала на фоне функциональных нарушений состояния здоровья лиц напряженных видов труда в УР исходит из концептуальных положений методологии профессионального здоровья, которая предполагает поиск эффективных организационных и методических подходов в области медицинского обеспечения лиц трудоспособного возраста в сложных условиях жизнедеятельности.

3. Современные психологические концепции психосоциальной адаптации в специфически затрудненной среде деятельности, включая неблагоприятные для сохранения психического здоровья профессиональные и экологические условия, могут расцениваться как исходная позиция выбора состава психологических тестов оценки личностного адаптационного потенциала.

4. Современные методы цифровой медицины позволяют посредством удаленной психологической консультативной помощи в ходе тематической телекоммуникации получить прогнозные оценки личностного адаптационного потенциала и рисков профессионально обусловленных дезадаптационных расстройств у работников трудоспособного возраста.

5. В случае выявления риска тяжелых осложнений астенизации и негативного прогноза динамики психического состояния пациента для врачей первичных звеньев здравоохранения в ходе коммуникации (возможно, в форме телеконференции) формируется мотивированное направление на консультацию специалистов смежных профессий или на госпитализацию для углубленного обслуживания, лечения и реабилитации по выявленным показаниям.

6. Как положительно зарекомендовавший себя прецедент применения ПТК в удаленных местностях выступает накопленный в последние годы опыт медицинской и психологической помощи лицам с симптомами стрессогенно обусловленных расстройств, а также постинфекционными нарушениями астенического характера после COVID-19.

7. Для психофизиологии труда по-прежнему актуальны вопросы обеспечения успешной психосоциальной адаптации в специфически затрудненную среду деятельности, включая неблагоприятные для сохранения здоровья экологические условия, в которых имеет место комплекс профессионально обусловленных расстройств: повышенная утомляемость, чувство усталости со снижением физической и/или умственной работоспособности, – который может рассматриваться в числе предикторов снижения профессионального долголетия и профессиональной надежности специалистов авиационного и космического профиля.

Исследование выполнено в рамках Программы Фундаментальных научных исследований РАН FMFR-2024-0034.

Список литературы

1. Карпов А.Б., Бадмаева Э.Р., Скобельский А.В., Антипов С.А. Проблемы организации медицинской помощи на удаленных промышленных объектах в России // Здравоохранение РФ. 2021. Т. 65. № 1. С. 54–61. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-1-54-61.
Karpov A.B., Badmaeva E.R., Skobelsky A.V., Antipov S.A. Problems of organizing medical care in remote industrial facilities in Russia // Zdravookhranenie RF. 2021. V. 65. № 1. P. 54–61. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-1-54-61.
2. Натензон М.Я. Телемедицина в Арктической зоне России. [Электронный ресурс] // Народонаселение и экономика. 2018. № 2 (2) С. 129–155. DOI:10.3897/popecon.2.e36050.
Natenzon M. Telemedicine in the Arctic Zone of Russia // Narodonaselenie i ekonomika. 2018. № 2 (2). P. 129–155. DOI: 10.3897/popecon.2.e36050.
3. Царегородцев А.Л. Эффективность использования телемедицины в северных регионах Российской Федерации // Фундаментальные исследования. 2016. № 3–2. С. 310–315.

Tsaregorodtsev A.L. Effectiveness of telemedicine in the Northern regions of the Russian Federation // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016. № 3–2. P. 310–315.

4. Железнякова И.А., Хелисупали Т.А., Омеляновский В.В., Тишкина С.Н. Анализ возможности применения зарубежного опыта оказания телемедицинских услуг в Российской Федерации // *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2020. № 2. С. 26–34.

Zheleznyakova I.A., Khelisupali T.A., Omelyanovskiy V.V., Tishkina S.N. Application of foreign experience of telemedicine services in the Russian Federation // *Medicinskie tehnologii. Otsenka i vybor*. 2020. № 2. P. 26–34. URL: <https://doi.org/10.17116/medtech20204002126>.

5. Семенова Н.В. Совершенствование психиатрической помощи населению: многоуровневая модель с интеграцией в первичную медицинскую сеть // *Врач-аспирант*. 2013. Т. 60. № 5. С. 57–65.

Semenova N.V. Improving psychiatric care for the population: a multilevel model with integration into the primary medical network // *Vrach-aspirant*. 2013. V. 60. № 5. P. 57–65.

6. Леванов В.М., Орлов О.И., Мерекин Д.В. Исторические периоды развития телемедицины в России // *Врач и информационные технологии*. 2013. № 4. С. 67–73.

Levanov V.M., Orlov O.I., Merekin D.V. Historical periods of telemedicine development in Russia // *Vrach i informatsionnye tekhnologii*. 2013. № 4. P. 67–73.

7. Камчатнов П.Р., Соловьева Э.Ю., Хасанова Д.Р., Фатеева В.В. Астенические и когнитивные нарушения у пациентов, перенесших COVID-19 // *Медицинское обозрение*. 2021. № 10. С. 636–641. DOI: 10.32364/2587-6821-2021-5-10-636-641.

Kamchatnov P.R., Solovyova E.Yu., Khasanova D.R., Fateeva V.V. Asthenic and cognitive disorders in patients who underwent COVID-19 // *Meditsinskoe obozrenie*. 2021. № 10. P. 636–641. DOI: 10.32364/2587-6821-2021-5-10-636-641.

8. Rudroff T., Fietsam A.C., Deters J.R. et al. Post-COVID-19 fatigue: potential contributing factors // *Brain Sci*. 2020. № 10 (12). e1012. DOI: 10.3390/brainsci10121012.

9. Леонтьев Д.А., Осин Е.Н. Методологические и методические вопросы эмпирического изучения и диагностики личностного потенциала // *Личностный потенциал: структура и диагностика* / Д.А. Леонтьев, ред. М., 2011.

Leontiev D.A., Osin E.N. Methodological and methodological issues of empirical study and diagnostics of personality potential // *Personal potential: structure and diagnostics* / D.A. Leontiev, ed. Moscow, 2011.

10. Бодров В.А. Развитие системного подхода в исследованиях профессиональной деятельности // *Психологический журнал*. 2007. Т. 28. № 3. С. 23–28.

Bodrov V.A. The development of the system approach in studies of professional activity // *Psikhologicheskii zhurnal*. 2007. V. 28. № 3. P. 23–28.

11. Марков В.Н. Личностно-профессиональный потенциал управленца и его оценка / А.А. Деркач, ред. М., 2001.

Markov V.N. Personality-professional potential of a manager and its assessment / A.A. Derkach, ed. Moscow, 2001.

12. Гандер Д.В., Алексеенко М.С. Особенности личностного потенциала летчика в цикле профессионального становления // *Психология и психотехника*. 2015. № 7. С. 684–696. DOI: 10.7256/2454-0722.2015.7.15692.

Gander D.V., Alekseenko M.S. Peculiarities of personal potential of a pilot in the cycle of professional formation // *Psikhologiya i psikhotehnika*. 2015. № 7. P. 684–696. DOI: 10.7256/2454-0722.2015.7.15692.

13. Алексеенко М.С. Личностный потенциал в практике психологического обеспечения летной деятельности // *Психология и психотехника*. 2021. № 4. С. 111–131. DOI: 10.7256/2454-0722.2021.4.35802.

Alexeenko M.S. Personality potential in the practice of psychological support of flight activity // *Psikhologiya i psikhotehnika*. 2021. № 4. P. 111–131. DOI: 10.7256/2454-0722.2021.4.35802.

14. Щербакова Е.А. Личностные особенности военного летчика высокого класса // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 3. Педагогика и психология*. 2011. № 2. С. 214–218.

Shcherbakova E.A. Personal features of the military pilot of high class // *Bulleten Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 3. Pedagogika psikhologiya*. 2011. № 2. P. 214–218.

15. Леонтьев Д.А. Личностная зрелость как опосредствование личностного роста // *Культурно-историческая психология развития* / И.А. Петухова, ред. М., 2001. С. 154–161.

Leontiev D.A. Personal maturity as a mediation of personal growth // *Cultural-historical psychology of development* / I.A. Petukhova, ed. Moscow, 2001. P. 154–161.

16. Васильева А.В. К вопросу изучения личностного потенциала, его структуры и роли // *Человек и образование*. 2016. № 2 (47). С. 128–133.

Vasilieva A.V. To the study of personal potential, its structure and role // *Chelovek i obrazovanie*. 2016. № 2 (47). P. 128–133.

17. Гандер Д.В., Алексеенко М.С. Личностный потенциал летчика: от теории к практике. М., 2012.

Gander D.V., Alekseenko M.S. Personal potential of a pilot: from theory to practice. Moscow, 2012.

18. Козлов В.В., Бубеев Ю.А., Власов Н.А. Психология и феноменология посттравматического стрессового расстройства. М., 2022.

Kozlov V.V., Bubeyev Y.A., Vlasov N.A. Psychology and phenomenology of post-traumatic

19. Леонова А.Б. Комплексные психологические технологии управления стрессом и оценка индивидуальной стресс-резистентности: опыт интеграции различных исследовательских парадигм // *Вестник Московского университета. Сер. 14. Психология*. 2016. № 3. С. 63–72.

Leonova A.B. Complex psychological technologies of stress management and assessment of individual stress-resistance: the experience of integrating different research

paradigms // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14. Psikhologiya. 2016. № 3. P. 63–72.

20. Соловьева С.Л. Ресурсы личности. [Электронный ресурс] // Медицинская психология в России. Электрон. науч. журн. 2010. № 2. URL: <http://medpsy.ru> (Доступ 22.09.2022).

Solov'eva S.L. Resources of the personality. [Electronic resource] // Medical psychology in Russia. Electronic scientific journal. 2010. № 2. URL: <http://medpsy.ru> (accessed: 22.09.2022).

21. Ярошук И.В. Психология жизнестойкости: обзор теоретических концепций, эмпирических исследований и методик диагностики // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. 2020. Т. 33. № 1. С. 50–60.

Yaroshchuk I.V. The psychology of hardiness: A review of theoretical concepts, empirical research and diagnostic techniques // Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta psikhologii i sotsial'noy raboty. 2020. V. 33. № 1. P. 50–60

22. Белов В.Г., Дмитриев М.Г., Апалькова И.Ю. Здоровье как основа социально-психологической адаптации человека // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. 2007. Т. 7. № 1. С. 44–48.

Belov V.G., Dmitriev M.G., Apalkova I.Yu. Health as a basis of socio-psychological adaptation of the person // Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta psikhologii i sotsial'noy raboty. 2007. V. 7. № 1. P. 44–48.

23. Никитина Е.В. Феномен жизнестойкости: концепция, современные взгляды и исследования // Academy. 2017. № 4 (19). С. 100–103.

Nikitina E.V. Phenomenon of resilience: concept, modern views and research // Academy. 2017. № 4 (19). P. 100–103.

24. Овчарова Р.В. Методология исследования жизнестойкости личности // Вестник Курганского государственного университета. 2019. № 2 (53). С. 59–65.

Ovcharova R.V. Methodology of the study of resilience of personality // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. 2019. № 2 (53). P. 59–65.

25. Логинова М.В. Жизнестойкость как внутренний ключевой ресурс личности // Вестник Московского университета МВД России. 2009. № 6. С. 19–22.

Loginova M.V. Resilience as an internal key resource of the person // Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii. 2009. № 6. P. 19–22.

26. Леонтьев Д.А., Рассказова Е.И. Тест жизнестойкости. М., 2006.

Leontiev D.A., Rasskazova E.I. The resilience test. M., 2006.

27. Анцыферова Л.И. Личность в трудных жизненных условиях: переосмысливание, преобразование ситуаций и психологическая защита // Психологический журнал. 1994. № 1. С. 3–16.

Antsyferova L.I. Personality in difficult life conditions: re-thinking, transformation of situations and psychological protection // Psikhologicheskiy zhurnal. 1994. № 1. P. 3–16.

28. Маклаков А.Г. Личностный адаптационный потенциал: его мобилизация и прогнозирование в экстремальных условиях // Психологический журнал. 2001. Т. 22. № 1. С. 16–24.

Maklakov A.G. Personal adaptation potential: its mobilization and forecasting in extreme conditions // Psikhologicheskiy zhurnal. 2001. V. 22. № 1. P. 16–24.

29. Леонтьев Д.А., Мандрикова Е.Ю., Осин Е. и др. Возможности эмпирического исследования личностного потенциала // Прикладная психология как ресурс социально-экономического развития современной России: Матер. межрег. науч.-практ. конф. М., 2005. С. 259–260.

Leontiev D.A., Mandrikova E.Yu. et al. Possibilities of empirical research of personal potential // Applied psychology as a resource for socio-economic development of modern Russia: Proceedings of an interregional scientific conference. Moscow, 2005. p. 259–260.

30. Вассерман Л.И., Исаева Е.Р., Новожилова М.Ю., Щелкова О.Ю. Психологические механизмы совладания со стрессом профессиональной деятельности (на модели лиц «опасных» профессий) // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Сер. 12. Вып. 4. С. 364–372.

Wasserman L.I., Isaeva E.R., Novozhilova M., Shchelkova O.Yu. Psychological mechanisms of coping with stress professional activity (on the model of individuals «dangerous» professions) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. 2008. Ser. 12. Is. 4. P. 364–372.

31. Никифоров Г.С., Дмитриева М.А., Снетков В.М. Практикум по психологии менеджмента и профессиональной деятельности. СПб., 2003.

Nikiforov G.S., Dmitrieva M.A., Snetkov V.M. Workshop on psychology of management and professional activity. St.-Petersburg, 2003.

32. Прохоров А.О. Методики диагностики и измерения психических состояний личности. М., 2004.

Prokhorov A.O. Techniques of diagnostics and measurement of mental states of a personality. Moscow, 2004.

33. Водопьянова Н.Е. Психодиагностика стресса. СПб., 2009.

Vodop'yanova N.E. Psychodiagnostic of stress. St.-Petersburg, 2009.

34. Александрова Л.А. Субъективная витальность как предмет исследования // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 1. С. 133–163.

Aleksandrova L.A. Subjective vitality as a research object // Psikhologiya. Zhurnal Vyshei shkoly ekonomiki. 2014. V. 11. № 1. P. 133–163.

35. Osgood C.E. Method and theory in experimental psychology. N.Y., 1956.

36. Барканова О.В. Методики диагностики эмоциональной сферы: психологический практикум. Красноярск, 2009.

Barkanova O.V. Methods for diagnosing the emotional sphere: a psychological workshop. Krasnoyarsk, 2009.

37. Сыркина А.Л., Бодров В.А., Бессонова Ю.В. Исследование содержательных характеристик ценностно-смысловой сферы профессионала методом репертуарных решеток // Проблемы фундаментальной и прикладной психологии профессиональной деятельности. М., 2008. С. 353–373.

Syrkina A.L., Bodrov V.A., Bessonova Yu.V. Study of the content characteristics of the value-semantic sphere of the professional by the method of repertory grids // Problems of fundamental and applied psychology of professional activity. Moscow, 2008. P. 353–373.

38. Ростовцева М.В., Гудовский И.В., Гончарова Т.М., Хохрина З.В. Исследование связи ценностных ориентаций и психологических механизмов адаптации личности // Психолог. 2017. № 4. С. 1–9. DOI: 10.25136/2409-8701.2017.4.23415.

Rostovtseva M.V., Gudovsky I.V., Goncharova T.M., Khokhrina Z.V. Research of connection of value orientations and psychological mechanisms of adaptation of the person // Psikholog. 2017. № 4. P. 1–9. DOI: 10.25136/2409-8701.2017.4.23415.

39. Тувышева Д.А., Атаманова Г.И. Эмпирическое исследование взаимосвязи качеств жизнестойкости и ценностно-смысловых ориентиров личности // Ярославский педагогический вестник. 2020. № 1 (112). С. 156–164. DOI: 10.20323/1813-145X-2020-1-112-155-163.

Tuvysheva D.A., Atamanova G.I. Empirical study of the relationship between the qualities of resilience and value-semantic orientations of personality // Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. 2020. № 1 (112). P. 156–164. DOI: 10.20323/1813-145X-2020-1-112-155-163.

40. Пилишвили Т.С., Савушкина А.И., Данилова А.Л., Соручко-Торрес Н.К. Психологическое благополучие и ценностно-смысловая сфера личности студентов-психологов // Образование и наука. 2021. № 23 (4). С. 126–156. URL: <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2021-4-126-156>.

Pilishvili T.S., Savushkina A.I., Danilova A.L., Soruko-Torres N.C. Psychological well-being and value-semantic sphere of personality among students-psychologists // Obrazovanie i nauka. 2021. № 23 (4). P. 126–156. URL: <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2021-4-126-156>.

41. Никифоров Г.С. Диагностика здоровья. Психологический практикум. СПб., 2007.

Nikiforov G.S. Diagnostics of Health. Psychological workshop. St.-Petersburg, 2007.

42. Рыбников В.Ю., Дубинский А.А., Булыгина В.Г. Индивидуально-психологические предикторы адаптации и дезадаптации специалистов экстремального профиля деятельности // Экология человека. 2017. № 3. С. 3–9. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-3-3-9.

Rybnikov V.Yu., Dubinsky A.A., Bulygina V.G. Individual psychological predictors of the adaptation and disadaptation among specialists of extreme // Ekologiya cheloveka. 2017. № 3. P. 3–9. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-3-3-9.

43. Ярошук И.В. Психология жизнестойкости: обзор теоретических концепций, эмпирических исследований и методик диагностики // Ученые записки

Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. 2020. Т. 33. № 1. С. 50–60.

Yaroshchuk I.V. The psychology of hardiness: A review of theoretical concepts, empirical research and diagnostic techniques // Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta psikhologii i sotsial'noy raboty. 2020. V. 33. № 1. P. 50–60.

44. Белов В.Г., Дмитриев М.Г., Апалькова И.Ю. Здоровье как основа социально-психологической адаптации человека // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. 2007. Т. 7. № 1. С. 44–48.

Belov V.G., Dmitriev M.G., Apalkova I.Yu. Health as a basis of socio-psychological adaptation of the person // Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta psikhologii i sotsial'noy raboty. 2007. V. 7. № 1. P. 44–48.

45. Gorelov V.A., Linskaya E.Y., Tatarkanov A.A. et al. Complex methodological approach to introduction of modern telemedicine technologies into the healthcare system on federal, regional and municipal levels // 2020 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). 2020. P. 468–473. DOI: 10.1109/ITQMIS51053.2020.9322864.

46. Карпухин И.Б., Леванов В.М. Телепсихиатрия: история, направления и возможности (по материалам зарубежного научного архива) // Социальная и клиническая психиатрия. 2020. № 1. С. 102–109.

Karpukhin I.B., Levanov V.M. Telepsychiatry: history, directions and possibilities (on materials of foreign scientific archive) // Sotsial'naya i klinicheskaya psikhiatriya. 2020. № 1. P. 102–109.

47. Орлов О.И., Богомолов В.В., Переведенцев О.В. и др. Средства телемедицинского обеспечения на месте посадки космических экипажей // Авиакосм. и экол. мед. 2012. Т. 46. № 5. С. 67–72.

Orlov O.I., Bogomolov V.V., Perevedentsev O.V. et al. Telemedicine tools on the place of space crews landing. // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2012. V. 46. № 5. P. 67–72.

48. Рогозин Д.М., Вырская М.С. Коммуникативные сбои и способы их преодоления в роботизированном телефонном опросе // Социологический журнал. 2019. Т. 25. № 2. С. 33–59. DOI: <https://doi.org/10.19181/socjour.2019.25.2.6385>.

Rogozin D.M., Vyrsкая M.C. Communicative failures and ways to overcome them in a robotic telephone survey // Sotsiologicheskiy zhurnal. 2019. V. 25. № 2. P. 33–59. DOI: <https://doi.org/10.19181/socjour.2019.25.2.6385>.

49. Барабанщиков В.А., Суворова Е.В. Оценка эмоционального состояния человека по его видеоизображению // Экспериментальная психология. 2020. Т. 13. № 4. С. 4–24. DOI: 10.17759/exppsy.2020130401.

Barabanshchikov V.A., Suvorova E.V. Assessment of the emotional state of a person by his video image // Eksperimental'naya psikhologiya. 2020. V. 13. № 4. P. 4–24. DOI: 10.17759/exppsy.2020130401.

50. Переведенцев О.В., Леванов В.М. Использование речевых технологий для оптимизации регламентов

проведения телемедицинских консультаций в экстремальных условиях // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2017. № 2 (4). С. 33–36. DOI: 10.29188/2542-2413-2017-3-2-92-95.

Perevedentsev O.V., Levanov V.M. Use of speech technologies for optimization of regulations of telemedicine consultations in extreme conditions // Zhurnal telemeditsiny i elektronnoy zdravookhraneniya. 2017. № 2 (4). P. 33–36. DOI: 10.29188/2542-2413-2017-3-2-92-95.

51. *Gaind B., Syal V., Padgalwar S.* Emotion detection and analysis on social media // Global J. of Engineering Sci. and Res. (ICRTCE-18). 2019. P. 78–89.

52. *Ranganathan H., Chakraborty S., Panchanathan S.* Multimodal emotion recognition using deep learning architectures // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2016. P. 1–9.

53. *Тимофеева О.П., Неимущев С.А., Неимущева Л.И., Тихонов И.А.* Распознавание эмоций по изображению лица на основе глубоких нейронных сетей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 16–24. DOI: 10.46960/1816-210X_2020_1_16.

Timofeeva O.P., Neimushchev S.A., Neimushcheva L.I., Tikhonov I.A. Recognition of emotions in facial image based on deep neural networks // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. 2020. № 1 (128). P. 16–24. DOI: 10.46960/1816-210.

54. *Рюмина Е.В., Карпов А.А.* Аналитический обзор методов распознавания эмоций по выражениям лица человека // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 163–176. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-163-176.

Ryumina E.V., Karpov A.A. Analytical review of methods for emotion recognition by human face expressions // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2020. V. 20. № 2. P. 163–176. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-163-176.

55. *Stockli S., Schulte-Mecklenbeck M., Borer S., Samson A.C.* Facial expression analysis with AFFDEX and FACET: A validation study // Behav. Res. Methods. 2018. V. 50 (4). P. 1446–1460.

56. FaceReader Facial expression recognition software [Electronic Resource] // URL: Facial expression recognition software | FaceReader (noldus.com) (accessed: 22.09.2022).

57. *Мубаракшина Р.Т., Яковенко А.А.* Обзор подходов к проблеме распознавания эмоций по параметрам устной речи // Сб. науч. трудов XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Системный анализ в проектировании и управлении». 2019. № 1. С. 392–397.

Mubarakshina R.T., Yakovenko A.A. Review of approaches to the problem of emotion recognition by the parameters of oral speech // Sb. nauchn. trudov XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sistemny analiz v proektirovanii i upravlenii. 2019. № 1. P. 392–397.

58. *Verkholyak O., Dvoynikova A., Karpov A.* A bimodal approach for speech emotion recognition using audio and text // J. of Internet Services and Information Security. 2021. № 11. P. 80–96. DOI: 10.22667/JISIS.2021.02.28.080.

59. *Картавенко М.В.* Об использовании акустических характеристик речи для диагностики

психических состояний человека // Известия ТРТУ. 2005. № 5. С. 164–180.

Kartavenko M.V. On the use of acoustic characteristics of speech for the diagnosis of human mental states // Izvestiya TRTU. 2005. № 5. P. 164–180.

60. *Сороколетова Н.Ю.* Функциональные возможности компьютерного приложения PRAAT // Иностранные языки: лингвистические и методические аспекты: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 27. Тверь, 2014. № 27. С. 127–131.

Sorokoletova N.Yu. Functionalities of the computer application PRAAT // Inostrannyye yazyki: lingvisticheskie i metodicheskie aspekty. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Is. 27. Tver', 2014. P. 127–131.

61. *Фролов М.В., Милованова Г.Б.* Особенности контроля состояния человека-оператора по показателям основного тона и спектра его речи // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 2. С. 136–138.

Frolov M.V., Milovanova G.B. Monitoring the functional state of human operators by the parameters of the fundamental tone and spectrum of speech // Fiziologiya cheloveka. 2009. V. 35. № 2. P. 136–138.

62. *Лебедева С.А., Швед Д.М., Гущин В.И.* Возможности компьютерного анализа акустических характеристик речи человека-оператора в условиях космического полета // Пилотируемые полеты в космос. 2020. № 3 (36). С. 109–124. DOI: 10.34131/MSF.20.3.109-124.

Lebedeva S.A., Shved D.M., Gushchin V.I. The potentials of computer analyzing the acoustic characteristics of a human speech under spaceflight conditions // Pilotiruemye polety v kosmos. 2020. № 3 (36). P. 109–124. DOI: 10.34131/MSF.20.3.109-124.

63. *Рюмина Е.В., Карпов А.А.* Сравнительный анализ методов устранения дисбаланса классов эмоций в видеоданных выражений лиц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 683–691. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-683-691.

Ryumina E.V., Karpov A.A. Comparative analysis of methods for imbalance elimination of emotion classes in video data of facial expressions // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2020. V. 20. № 5. P. 683–691. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-683-691.

64. *Рюмин Д.А., Кагиров И.А.* Подходы к автоматическому распознаванию жестовой информации: аппаратное обеспечение и методы // Пилотируемые полеты в космос. 2021. № 3 (40). С. 82–99.

Ryumin D.A., Kagiroy I.A. Approaches to automatic recognition of gesture information: hardware and methods // Pilotiruemye polety v kosmos. 2021. № 3 (40). P. 82–99.

65. *Двойникова А.А., Кагиров И.А., Карпов А.А.* Аналитический обзор методов автоматического распознавания вовлеченности пользователя в виртуальную коммуникацию // Информационно-управляющие системы. 2022. № 5. С. 12–22. URL: <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-5-12-22>.

Dvoynikova A.A., Kagiroy I.A., Karpov A.A. Analytical review of methods for automatic detection of user

engagement in virtual communication // *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2022. № 5. P. 12–22. URL: <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-5-12-22>.

66. Двойникова А.А., Маркитантов М.В., Рюмина Е.В. и др. Анализ информационного и математического обеспечения для распознавания аффективных состояний человека // *Информатика и автоматизация*. 2022. № 21 (6). С. 1097–1144. URL: <https://doi.org/10.15622/ia.21.6.2>.

Dvoynikova A.A., Markitantov M.V., Ryumina E.V. et al. Analysis of infoware and software for human affective states recognition // *Informatika i avtomatizatsiya*. 2022. № 21 (6). P. 1097–1144. URL: <https://doi.org/10.15622/ia.21.6.2>.

67. О психологической помощи населению в Российской Федерации. Законопроект № 553338-6 [Электронный ресурс]. URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/553338-6> (дата обращения: 06.11.2022).

On psychological assistance to the population in the Russian Federation. Draft law № 553338-6 [Electronic resource] // URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/553338-6> (accessed 06.11.2022).

68. Мясников В.И., Степанова С.И., Сальницкий В.П. и др. Проблема психической астенизации в космическом полете. М., 2000.

Myasnikov V.I., Stepanova V.P., Salnitsky O.P. et al. Problem of mental asthenization in space flight. Moscow, 2000.

69. Симонов П.В., Усков Ф.Н., Кушнерева О.В. и др. Дистанционное наблюдение и экспертная оценка: Общение и коммуникация в задачах мед. контроля / П.В. Симонов, В.И. Мясников, ред. М., 1982.

Simonov P.V., Uskov F.N., Kushnereva O.V. et al. Remote observation and expert evaluation: communication and communication in the tasks of medical control. Moscow, 1982.

70. Мясников В.И., Гушин В.И., Юсупова А.К. Предварительные результаты психологического анализа коммуникаций экипажей международной космической станции // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. Сер. Психология. 2005. Вып. 1 (45). С. 112–118.

Myasnikov V.I., Gushchin V.I., Yusupova A.K. Preliminary results of psychological analysis of the international space station crew communications // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. Ser. Psikhologiya. 2005. Is. 1 (45). P. 112–118.

Поступила 25.04.2023

PRACTICE OF TELECONSULTATION FOR EVALUATION OF PERSONAL ADAPTATION POTENTIAL AND DETECTION OF INDICATIONS FOR PROVIDING QUALIFIED PSYCHOLOGICAL SERVICES TO EMPLOYEES IN REMOTE REGIONS OF RUSSIA

Bubeev Yu.A.¹, Syrkin L.D.², Polyakov A.V.¹, Usov V.M.¹, Karpov A.A.³, Ivanov A.V.¹

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)

³St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Psychological teleconsultations (PTCs) to people in remote regions of Russian are discussed in terms of current views, methods and procedures applied to evaluate the adaptation potential of patients with mental health disorders.

Early detection of the risks to mental health of employees is based on awareness of criticality of the adaptation potential and mental adaptability for successful overcoming the hardships of psychosocial adaptation. High-quality PTCs enable recognition of emotional reactions and feedback about patient's mental condition.

Analysis of the PTCs services provided during action of the COVID-19 restrictions demonstrated PTCs usability for personified diagnostics in remote regions. Besides the interactive objective data acquisition, PTCs can advice a person-centered program of risks prevention, health improvement or treatment in a local medical care organization.

Moreover, personal adaptation potential evaluation in local medical care organizations will help in detecting a deteriorated psychic adaptation potential. Artificial neural networks trained using data corpora (Data sets) are likely to recognize emotions automatically and thus to perfect the PTCs quality.

Key words: remote regions, psychological support to population, psychological adaptation potential, personal adaptation potential, psychological on-line consultation.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 5–16.

УДК 612.115+613.6

СИСТЕМА ГЕМОКОАГУЛЯЦИИ В НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЭФФЕКТЫ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА: ПО МАТЕРИАЛАМ РОССИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кузичкин Д.С., Маркин А.А., Журавлева О.А., Кочергин А.Ю., Ничипорук И.А.

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

E-mail: andre_markine@mail.ru

В обзоре представлены результаты исследований системы гемокоагуляции в советских и российских экспериментах, моделирующих действие факторов космического полета на организм человека. Наиболее адекватными моделями невесомости признаны антиортостатическая гипокинезия и иммерсия. Действие перегрузок воспроизводилось с помощью вращения на центрифуге.

В динамике экспериментов с гипокинезией наблюдалось разнонаправленное изменение активности прокоагулянтного, антикоагулянтного и фибринолитического звеньев гемостаза, состояние которых зависело от продолжительности пребывания в условиях ограниченной двигательной активности. В условиях иммерсии исследователи наблюдали увеличение прокоагулянтной активности и снижение фибринолитической при разнонаправленных изменениях антикоагулянтного потенциала крови. По одним данным, воздействие гипергравитации приводит к повышению антикоагулянтной и фибринолитической активности на фоне гипокоагуляции, а по другим – к гиперкоагуляции, сопровождающейся активацией фибринолиза. Сочетание гравитационных нагрузок и разгрузки приводит, по мнению исследователей, к снижению прокоагулянтной и повышению фибринолитической активности. Отличия послеполетных данных от результатов модельных экспериментов обусловлены невозможностью воссоздания действия всего комплекса факторов космического полета на организм человека в земных условиях.

Ключевые слова: космическая медицина, факторы космического полета, гемостаз, иммерсия, антиортостатическая гипокинезия, перегрузки, центрифуга короткого радиуса.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 17–24.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-17-24

Система регуляции агрегатного состояния крови является важным компонентом формирования общего гомеостатического равновесия в организме человека. Ее реакции в значительной степени определяют стрессоустойчивость и адаптивные возможности при действии неблагоприятных факторов внешней среды. Однако ее функционирование при воздействии факторов космического полета

недостаточно изучено. Это связано с невозможностью в настоящее время проведения такого рода исследований в условиях невесомости.

Действительно, доступных данных литературы о послеполетных исследованиях системы гемостаза очень мало, а данные по бортовым исследованиям или исследованиям биоматериала, отобранного на борту и отправленного на Землю, вообще отсутствуют. Поэтому основное внимание сконцентрировано на изучении системы гемокоагуляции в модельных наземных экспериментах. Так, в ходе длительной антиортостатической гипокинезии (20–60 сут) происходит усиление тромбообразования, фибринообразования и фибринолиза [1]. Результаты экспериментов с гипокинезией и иммерсией указывали на тенденцию к гипокоагуляции во время постельного режима и усилению прокоагулянтной активности во время ортостатической пробы, а также на повышение уровня циркулирующих микрочастиц эндотелия в ходе иммерсии [2]. Согласно другой работе, у здоровых людей гипергравитация приводит к повышению свертываемости крови в физиологических пределах за счет возрастания адгезии эритроцитов, активации эндотелиальных клеток и повышения реактивности тромбоцитов [3]. В других работах [4–5] также отмечается активация тромбоцитов под воздействием гипергравитации. В исследовании, проведенном на мелких животных [6], показано, что функции тромбоцитов ингибируются в условиях микрогравитации и активируются в условиях гипергравитации.

Согласно результатам исследований крови космонавтов после завершения орбитальных экспедиций, в основном факторы космического полета способствуют повышению прокоагулянтного потенциала плазмы, эндотелия и тромбоцитов [7–13]. Однако, по данным некоторых исследователей, отдельные факторы космического полета могут приводить к гипокоагуляции [14]. Исследования системы гемостаза в плазме, полученной на борту, в доступной нам литературе отсутствуют. Наземные модельные эксперименты позволяют детально исследовать и дифференцировать влияние факторов космического полета на организм человека.

Представленный обзор содержит данные советских экспериментальных исследований, полученных еще на заре космической медицины, а также результаты современных исследований в российских наземных модельных экспериментах.

Эксперименты с гипокинезией и иммерсией

По данным О.Д. Анашкина [15], при антиортостатической гипокинезии у человека наблюдается двухфазное изменение системы свертывания крови: на 8-е сутки постельного режима время свертывания плазмы сокращается, повышается толерантность плазмы к гепарину, увеличивается активность протромбинового комплекса и проакцелерина, активность тромбопластина и содержание фибриногена в крови; в последующие периоды гипокинезии у большинства испытуемых наблюдается тенденция к снижению способности крови к свертыванию. Автор связывает это явление с ингибированием синтеза прокоагулянтов в печени вследствие общего снижения обменных процессов и увеличения содержания гепарина в крови.

По данным Л.М. Филатовой и О.Д. Анашкина [16], на 8-е сутки пребывания испытуемых в горизонтальном положении наблюдалось увеличение тромбогенного потенциала крови, что выражалось в повышении толерантности плазмы к гепарину и сокращении времени рекальцификации. В последующие периоды наблюдения (до 64 сут) отмечалось замедление свертываемости крови.

В условиях 120-суточной гипокинезии наблюдалось увеличение свертывающей активности крови, что выражалось в повышении толерантности плазмы к гепарину, сокращении времени рекальцификации и увеличении активности протромбинового комплекса [17]. На ранних стадиях гипокинезии (до 35 сут) отмечалось повышение фибринолитической активности, на более поздних (70 и 105 сут) – снижение фибринолитической реакции и отсутствие компенсаторных изменений со стороны антикоагулянтной системы.

При изучении системы гемокоагуляции у испытуемых, которые находились в антиортостазе (-4°) в течение 49 сут [17], была обнаружена отчетливая тенденция к повышению общей активности системы свертывания крови (повышенная толерантность плазмы к гепарину, активность протромбинового комплекса, сокращение тромбинового времени на 10-е и 25-е сутки эксперимента) и отдельных прокоагулянтов (повышенная концентрация факторов VIII и IX на 10-е и 25-е сутки, активность XIII фактора на 42–45-е сутки). В то же время было выявлено снижение антикоагулянтной активности (понижение концентрации свободного гепарина на 10-е и 25-е сутки). Фибринолитическая активность незначительно повысилась только на 10-е сутки. Автор указывает на отсутствие компенсаторной реакции со

стороны антикоагулянтного и фибринолитического звеньев гемостаза в ответ на повышение прокоагулянтной активности.

Г.С. Федулова и соавт. [18] изучали эффекты вестибулярной нагрузки, создаваемой визуально-вестибулярным воздействием в антиортостатическом положении (-15°). Через 20 мин после прекращения нагрузки были обнаружены изменения в коагулограмме, свидетельствующие об увеличении потенциала свертывания крови (сокращение тромбинового времени, повышение уровня фибриногена, фактора XIII, ускорение агрегации тромбоцитов). При этом было отмечено удлинение протромбинового времени. В ответ на повышение уровня тромбина в крови, по мнению автора, также активируется его основной ингибитор антитромбин III, в результате чего отмечается выраженная утилизация тромбина. В качестве ответной реакции автор отмечает повышение фибринолитической активности.

В эксперименте с 21-часовой антиортостатической гипокинезией (-15°) с дополнительным использованием 20 мг фуросемида в конце 13-го часа воздействия для усиления эффекта гипогидратации, в течение всех сроков эксперимента наблюдалось прогрессирующее увеличение центральных значений содержания растворимых фибрин-мономерных комплексов (8,4 – 20,3 – 28,7 % соответственно к 13, 16 и 20-му часу экспозиции), что, по-видимому, отражает процесс усиленного фибриногенеза и инициацию образования фибрина [19]. Однако концентрации фибриногена и D-димера существенно не отличались от фоновых значений в течение всех периодов обследования. Вероятно, кратковременное воздействие не привело к увеличению образования фибрина, его стабилизации и развитию фибринолитической реакции. Известно, что антиортостатическая гипокинезия точно воспроизводит условия перераспределения жидких сред организма и связанной с этим дегидратации [20]. Было показано [21], что вязкость крови увеличивается в динамике антиортостатической гипокинезии -8° и как следствие замедляется кровоток в микрососудах, образуется застой в венозной и капиллярной частях периферической сосудистой системы. Возможно, гемоконцентрация, развивающаяся во время постельного режима и усиливающаяся при введении фуросемида, а также снижение скорости венозного кровотока, наблюдаемое в условиях антиортостаза [22, 23], приводят к увеличению концентрации факторов свертывания и фосфолипидных матриц, способствуя росту межмолекулярного взаимодействия [24], приводящего к ускорению образования растворимых мономеров фибрина.

Модель «сухой» иммерсии воссоздает такие эффекты космического полета, как гиподинамия и перераспределение жидкостей организма [25].

По данным М.А. Худяковой и Е.Б. Шульженко [26], на 2, 8, 10 и 12-е сутки «сухой» иммерсии время рекальцификации плазмы, тромбопластиновое время, содержание гепарина в плазме снижались, снижались фибринолитическая активность и толерантность плазмы к гепарину, повышалась концентрация протромбинового комплекса. Авторы предполагают, что гиперкоагуляция может быть вызвана замедлением скорости кровотока, сгущением крови и нарушением проницаемости сосудов, отмечая, что в этих условиях факторы свертывания из форменных элементов и эндотелия сосудов высвобождаются в общий кровоток.

В исследованиях А.Н. Фомина [8] наблюдалась умеренная гиперфибринемия, максимум которой приходился на 4-е сутки погружения в иммерсионную ванну, а концентрация фибриногена коррелировала с гематокритным числом, что дало автору основания рассматривать гемоконцентрацию как одну из причин увеличения содержания фибриногена в крови во время иммерсии.

Л.Л. Кириченко, В.Н. Орлов и др. [27, 28] на 3-и сутки иммерсии отмечали у добровольцев тенденции к увеличению содержания количества тромбоцитов и интенсивности их агрегации, уменьшению максимального времени свертывания, значительному снижению фибринолитической активности. На 7-е сутки эксперимента наблюдалась тенденция к сокращению времени свертывания крови, снижению толерантности плазмы к гепарину, значительному повышению уровня фибриногена, снижению фибринолитической активности, увеличению содержания и интенсивности агрегации тромбоцитов. По мнению авторов, увеличение общего коагуляционного потенциала крови следует рассматривать как проявление адаптационного синдрома в ответ на нахождение в безопорной среде. Исследователи отмечают, что изменения связаны со снижением скорости кровотока, нарушением проницаемости сосудов, высвобождением коагулянтов и биологически активных веществ из форменных элементов, ацидозом, развитием капилляротрофической недостаточности в микрососудистом русле, повышением уровня свободных жирных кислот и вязкости крови. На фоне уменьшения фибринолитической активности крови авторы также наблюдали снижение уровня α_1 -антитрипсина, являющегося одним из ингибиторов плазмина, что исследователи связывают с проявлением защитной реакции организма, направленной на устранение блокады плазминовой системы и улучшение кровотока. На 2-е сутки периода реадаптации все изученные показатели клеточного гемостаза и фибринолиза возвращались к своим фоновым значениям [28].

Во время 21-суточного эксперимента с «сухой» иммерсией наблюдалось умеренное повышение концентрации фибриногена на 16,5 % к 7-м

суткам воздействия относительно фоновых уровней. Значения показателей антитромбина и протеина С имели схожую динамику изменений, однако содержание антитромбина III статистически значительно увеличивалось к 7-м суткам на 6,2 %, а протеина С к 21-м суткам – на 7,9 %. Уровни плазминогена и α_2 -антиплазмина повысились на 7-е сутки эксперимента на 13,6 и 6,7 % соответственно. Уровень D-димера статистически значимо не изменялся в течение всех сроков обследования [29]. Вероятно, одной из причин повышения уровня белка является гемоконцентрация. Во время этого эксперимента было обнаружено увеличение значения гематокрита примерно на 10 %. Известно, что при иммерсии отрицательный водный баланс колеблется в диапазоне 400-2000 мл [30]. Когда в иммерсии скорость кровотока уменьшается [31], создаются благоприятные условия для развития межмолекулярного взаимодействия регуляторных белков с их субстратами, адсорбции на фосфолипидных мембранах, комплексообразования [24, 32] и лизиса активированных комплексов [33], что приводит к возвращению концентраций изученных белков к фоновому уровню в условиях гемоконцентрации на 21-е сутки. Вероятно, из-за активации эндотелия [34] уменьшение количества тромбомодулина, экспрессируемого на мембранах, способствует снижению степени активации протеина С, что, напротив, приводит к замедлению повышения его уровня [35]. Итак, во время 21-суточной «сухой» иммерсии, в основном к 7-м суткам эксперимента, наблюдалось умеренное повышение концентрации фибриногена, антитромбина III и белков фибринолиза. По-видимому, это было связано с гемоконцентрацией, наблюдаемой во время эффекта погружения, и изменениями реологических характеристик крови. Активации процессов фибринообразования и фибринолиза не наблюдалось.

Результаты исследований системы гемостаза в экспериментах с гипокинезией и иммерсией указывают, как правило, на повышение прокоагулянтного потенциала крови, особенно в ранний период адаптации к воздействию. Данные изменения могли быть вызваны сочетанием физиологических эффектов воздействия (гемоконцентрация, изменение скорости кровотока) с развитием стресс-реакции организма.

Эксперименты с гипергравитацией и ее сочетанием с гравитационной разгрузкой

Многие исследователи [36–39] отмечают морфологические и функциональные нарушения, связанные с системой гемостаза или влияющие на ее деятельность (кровоизлияния на теле, кровоизлияния в различные органы и ткани, тромбоз, изменения прочности и проницаемости сосудистой стенки) после воздействия перегрузок.

Чрезмерный гемодинамический стресс, наблюдаемый при перегрузках [40], может вызвать повреждение эндотелиальных клеток, вплоть до их отслоения. При этом происходят морфологические и функциональные изменения, что приводит к значительному увеличению проницаемости, способствует внутрисосудистой агрегации тромбоцитов, отложению фибрина и накоплению липидов в стенках сосудов.

Результаты исследований М.В. Надирян [41] по изучению влияния радиальных перегрузок на процесс свертывания крови указывают на то, что перегрузки вызывают гиперкоагуляцию.

Л.А. Субботина [42] отметила, что динамическая перегрузка (вращение на центрифуге с параметрами +3,5 и 6 g, со скоростью нарастания 0,4 ед/с) вызывала интенсивную реакцию гемокоагуляции. В то же время наблюдалось сокращение времени рекальцификации и времени свертывания эуглобулиновой фракции, что свидетельствует об увеличении прокоагулянтной активности [43] при недостаточном компенсаторном ускорении лизиса эуглобулиновой фракции, что свидетельствует о снижении фибринолитической активности. Экстремальный потенциал свертывания инициировал избыток прокоагулянтов (факторы XII, XI, VII, VIII, V, X) и блокаду защитных белков – плазминогена, проэнзимов эуглобулина, пламина.

В экспериментах с центрифугой короткого радиуса [44] испытуемых подвергали 3-кратному вращению с направлением перегрузки «голова – таз» (+Gz): 1-е вращение со значением перегрузки 2,1 g в течение 30 мин, 2-е – 2,4 g, 30 мин, 3-е – 2,9 g, 15 мин. Каждый испытуемый подвергался воздействию гипергравитации во всех 3 режимах. Интервал между 1-й и 2-й ротациями составлял 2 сут, между 2-й и 3-й – 3 сут. В ходе эксперимента наблюдалось прогрессирующее повышение уровня растворимых фибриномономерных комплексов в плазме крови с увеличением на 65 % после 3-й ротации. Увеличение уровня растворимых фибриномономерных комплексов может наблюдаться из-за изменения скорости кровотока, особенно в венозном русле. Этот тип вращения способствовал инерционному оттоку крови к нижним конечностям, замедляя кровотоки в венах ног и ускоряя его в венах головы и шеи. Кроме того, увеличение емкости венозных коллекторов нижней половины тела и связанное с этим изменение геометрии просвета вен могло усилить различия в гемореологических характеристиках дистальных и проксимальных сосудов [45].

Большой интерес представляют эксперименты, в которых испытуемых тестировали на центрифуге короткого радиуса непосредственно до и после гипокинезии или иммерсии, поскольку такие условия испытаний были максимально приближены к условиям космического полета. По мнению

М.А. Худяковой и Е.Б. Шульженко [26], на 8, 10 и 12-е сутки иммерсии многие параметры гемостаза (общее время свертывания, повышенная толерантность плазмы к гепарину, тромбиновое время, концентрация протромбинового комплекса, тромбобластинное время, уровень гепарина, содержание фибрина) у испытуемых с дополнительным гипергравитационным воздействием вернулись к фоновым значениям, в отличие от испытуемых, которые находились в «чистых», без гипергравитации, условиях «сухой» иммерсии. Авторы связывают снижение концентрации прокоагулянтов со снижением уровня их синтеза печенью, а повышение фибринолитической активности связано с изменением проницаемости сосудов и высвобождением тканевого активатора плазминогена в кровотоки. По мнению О.Д. Анашкина [15], при последовательном воздействии гиподинамии и перегрузки у испытуемых наблюдалось значительное снижение общей свертывающей способности крови, выраженное в увеличении содержания гепарина в крови, повышении фибринолитической активности и снижении содержания фибриногена. Под действием перегрузок непосредственно до и после гипокинезии у испытуемых наблюдалось более выраженное снижение свертывающей способности крови, чем под действием одного только постельного режима, что автор связывает с развитием дистрофических процессов в печени под влиянием перегрузок.

Влияние скорости кровотока на систему гемостаза неоднозначно. Низкая скорость кровотока способствует ассоциации факторов свертывания крови, комплексообразованию [24, 33], адгезии тромбоцитов за счет активации фактора Виллебранда и их агрегации [46]. Высокая скорость кровотока увеличивает интенсивность процессов поступления субстрата и удаления продуктов мембраносвязанных ферментативных реакций каскада свертывания [32, 47], способствует лизису связанного фактора Виллебранда протеазами плазмы [48]. Помимо этого, параметры гемодинамики влияют на формирование фибринового сгустка и его стабилизацию [49].

Известно, что развитие психофизиологического напряжения приводит к активации гемокоагуляции и увеличению прокоагулянтного потенциала системы регуляции агрегатного состояния крови [50–52]. Возникающий в это время нейроэндокринный ответ приводит к незамедлительным гемодинамическим сдвигам, повышению вязкости крови и гемоконцентрации [53]. Наиболее важными гуморальными регуляторами гемостаза при остром стрессе является адреналин, а во время хронического – кортизол [54].

Известно, что адреналин способен активировать агрегацию тромбоцитов [55] и внутренний путь коагуляционного каскада [56, 57]. Адреналин также стимулирует сосудистые эндотелиальные β_2 -адренорецепторы, что приводит к высвобождению

предварительно сформированных VIII фактора коагуляционного каскада, фактора Виллебранда и тканевого активатора плазминогена из эндотелиальных накопительных пулов в циркуляторное русло [51, 58, 59]. Сходный эффект имеет введение глюкокортикоидов [60], а кортизол к тому же способствует повышению уровня фибриногена [61].

Факторы космического полета существенно влияют на функционирование системы гемостаза. Это подтверждается результатами не только российских, но также американских и европейских исследований. Данная проблема со временем будет только увеличивать свою актуальность и значимость, так как космический полет становится все более доступным лицам с парциальной недостаточностью здоровья, прошедшим ускоренный курс предполетной подготовки. При планируемых межпланетных пилотируемых полетах будут также приобретать особое значение другие факторы, такие как повышенный радиационный фон, гипомангнитная среда, напланетная деятельность, способные оказывать влияние на систему гемостаза. Все это будет требовать развития методов диагностики, средств профилактики и коррекции сдвигов равновесия в системе регуляции агрегатного состояния крови.

Выводы

1. В динамике экспериментов с гипокинезией наблюдается разнонаправленное изменение активности прокоагулянтного, антикоагулянтного и фибринолитического звеньев гемостаза, состояние которых зависит от продолжительности пребывания в условиях ограниченной двигательной активности.
2. В условиях иммерсии исследователи наблюдали увеличение прокоагулянтной активности и снижение фибринолитической при разнонаправленных изменениях антикоагулянтного потенциала крови. Выявленные эффекты авторы связывают с замедлением кровотока, гемоконцентрацией и нарушением проницаемости сосудов.
3. По данным одних авторов, при воздействии гипергравитации наблюдалось повышение антикоагулянтной и фибринолитической активности на фоне гипокоагуляции, а по результатам других происходила гиперкоагуляция, сопровождающаяся активацией фибринолиза.
4. Сочетание гравитационных нагрузок и разгрузки приводит, по мнению исследователей, к снижению прокоагулянтной и повышению фибринолитической активности, что обусловлено изменением проницаемости сосудов и снижением интенсивности синтетических процессов в печени.
5. Отличия послеполетных данных от результатов экспериментов обусловлены прежде всего тем, что в полете факторы действуют комплексно и дают сочетанный эффект. Однако наземные

модельные эксперименты остаются ценным источником данных, позволяя дифференцировать эффекты различных факторов космического полета.

Работа выполнена в рамках темы РАН № 65.1.

Список литературы

1. Kim D.S., Vaquer S., Mazzolai L. et al. The effect of microgravity on the human venous system and blood coagulation: a systematic review // *Exp. Physiol.* 2021. V. 106. № 5. P. 1149–1158.
2. Limper U., Tank J., Ahnert T. et al. The thrombotic risk of spaceflight: has a serious problem been overlooked for more than half of a century? // *Eur. Heart J.* 2021. V. 42. № 1. P. 97–100.
3. Limper U., Ahnert T., Maegele M. et al. Simulated hypergravity activates hemostasis in healthy volunteers // *J. Am. Heart Assoc.* 2020. V. 9. № 24. ePub 016479. DOI: 10.1161/JAHA.120.016479.
4. Rubenstein D.A., Yin W. Hypergravity and hypobaric hypoxic conditions promote endothelial cell and platelet activation // *High Alt. Med. Biol.* 2014. V. 15. № 3. P. 396–405.
5. Li S., Shi Q., Wang Z. et al. Hypergravity results in human platelet hyperactivity // *J. Physiol. Biochem.* 2009. V. 65. № 2. P. 147–156.
6. Dai K., Wang Y., Yan R. et al. Effects of microgravity and hypergravity on platelet functions // *Thromb Haemost.* 2009. V. 101. № 5. P. 902–910.
7. Легеньков В.И., Токарев Ю.Н. Гематологические исследования. Космические полеты на кораблях «Союз». Биомедицинские исследования. М., 1976. С. 304–319.
Legenkov V.I., Tokarev Yu.N. Hematological studies. Space flights on Soyuz spacecraft. Biomedicine studies. Moscow, 1976. P. 304–319.
8. Фомин А.Н. Фибриноген крови при 7-суточной водной иммерсии и в кратковременном космическом полете // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1981. Т. 15. № 5. С. 83–85.
Fomin A.N. Blood fibrinogen during 7-day water immersion and in a short-term space flight // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1981. V. 15. № 5. P. 83–85.
9. Кузичкин Д.С., Морук Б.В., Маркин А.А. и др. Показатели системы гемостаза после кратковременных космических полетов и в эксперименте с 7-дневной «сухой» иммерсией // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 4. С. 125–129.
Kuzichkin D.S., Morukov B.V., Markin A.A. et al. Hemostasis system indices after short-term space flights and in the experiment with 7-day «dry» immersion // *Fiziologiya cheloveka.* 2010. V. 36. № 4. P. 125–129.
10. Stein T.P., Schluter M.D. Plasma protein synthesis after spaceflight // *Aviation, Space and Environ. Med.* 2006. V. 77. № 7. P. 745–748.
11. Marshall-Goebel K., Laurie S.S., Alferova I.V. et al. Assessment of jugular venous blood flow stasis and thrombosis during spaceflight // *JAMA Netw. Open.* 2019. V. 2. № 11. ePub 1915011. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2019.15011.

12. Auñón-Chancellor S.M., Pattarini J.M., Moll S., Sargsyan A.N. Venous thrombosis during spaceflight // *Engl. J. Med.* 2020. V. 382. № 1. P. 89–90.
13. Zwart S.R., Auñón-Chancellor S.M., Heer M. et al. Albumin, oral contraceptives, and venous thromboembolism risk in astronauts // *J. Appl. Physiol.* 2022. V. 132. № 5. P. 1232–1239.
14. Locatelli L., Colciago A., Castiglioni S., Maier J.A. Platelets in wound healing: what happens in space? // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021. V. 9. ePub 716184. DOI: 10.3389/fbioe.2021.716184.
15. Анашкин О.Д. Влияние гипокинезии, перегрузки и пониженного питания на состояние свертывающей системы крови человека // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1969. Т. 3. № 1. С. 89–94.
- Anashkin O.D. The influence of hypokinesia, overload and low nutrition on the state of the human blood clotting system // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1969. V. 3. № 1. P. 89–94.
16. Филатова Л.М., Анашкин О.Д. Изменения в системе свертывания крови у человека при длительной гипокинезии // *Вестник экспериментальной биологии.* 1968. Т. 65. № 6. С. 36–39.
- Filatova L.M., Anashkin O.D. Changes in the blood clotting system in humans with prolonged hypokinesia // *Vestnik eksperimental'noy biologii.* 1968. V. 65. № 6. P. 36–39.
17. Филатова Л.М. Влияние 120-дневной гипокинезии на состояние системы свертывания крови человека. Система свертывания крови и фибринолиз. 1975. С. 472–473.
- Filatova L.M. The effect of 120-day hypokinesia on the state of the human blood clotting system. Blood coagulation system and fibrinolysis. 1975. P. 472–473.
18. Федулова Г.А., Зарицкий В.В., Сытник С.И. Характеристики гемостатического потенциала человека при вестибулярной нагрузке // *Косм. биол.* 1991. Т. 25. № 3. С. 60–61.
- Fedulova G.A., Zaritsky V.V., Sytnik S.I. Characteristics of human hemostatic potential under vestibular load // *Kosmicheskaya biologiya.* 1991. V. 25. № 3. P. 60–61.
19. Кузичкин Д.С., Баранов М.В., Ковалев А.С. и др. Влияние дегидратации и инфузии кровозамещающих растворов на показатели системы гемостаза в эксперименте с 21-часовой антиортостатической гипокинезией // *Авиакосм. и экол. мед.* 2009. Т. 43. № 6. С. 19–23.
- Kuzichkin D.S., Baranov M.V., Kovalev A.S. et al. The effect of dehydration and infusion of blood-substituting solutions on the hemostasis system indices in an experiment with 21-hour antiorthostatic hypokinesia // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2009. V. 43. № 6. P. 19–23.
20. Михайлов В.И., Алексеева В.П., Кузьмин М.П., Мацнев Е.И. Антиортостатическая гипокинезия как приближенная модель невесомости // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1979. Т. 13. № 1. С. 23–28.
- Mikhaylov V.I., Alekseeva V.P., Kuzmin M.P., Matsnev E.I. Anti-orthostatic hypokinesia as an approximate model of weightlessness // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1979. V. 13. № 1. P. 23–28.
21. Иванов А.П., Гончаров И.Б., Репенкова Л.Г. Изменения реологических показателей крови и гемодинамики в условиях 14-суточной антиортостатической гипокинезии // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1990. Т. 24. № 4. С. 30–32.
- Ivanov A.P., Goncharov I.B., Repenkova L.G. Changes in rheological parameters of blood and hemodynamics in conditions of 14-day antiorthostatic hypokinesia // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1990. T. 24. № 4. C. 30–32.
22. Казакова Р.Т., Катунцев В.П. Состояние центральной и общей гемодинамики у здорового человека в условиях моделируемой невесомости // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1990. Т. 24. № 1. С. 15–17.
- Kazakova R.T., Katuntsev V.P. The state of central and general hemodynamics in a healthy person in simulated weightlessness // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1990. V. 24. № 1. P. 15–17.
23. Шашков В.С., Мотин А.Ю., Ильина С.Л. и др. Фармакологическая коррекция гемодинамики при моделировании раннего периода адаптации к невесомости // *Авиакосм. и экол. мед.* 1999. Т. 33. № 3. С. 3–8.
- Shashkov V.S., Motin A.Yu., Ilyina S.L. et al. Pharmacological correction of hemodynamics in modeling the early period of adaptation to weightlessness // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 1999. V. 33. № 3. P. 3–8.
24. Diquélou A., Dupouy D., Gaspin D. et al. Relationship between endothelial tissue factor and thrombogenesis under blood flow conditions // *Thrombosis and haemostasis.* 1995. V. 74. P. 778–783.
25. Шульженко Е.Б., Виль-Вильямс И.Ф. Возможность осуществления длительной водной иммерсии методом «сухого» погружения // *Косм. биология.* 1976. Т. 10. № 2. С. 82–84.
- Shulzhenko E.B., Wil-Williams I.F. The possibility of long-term water immersion by the method of «dry» immersion // *Kosmicheskaya biologiya.* 1976. V. 10. № 2. P. 82–84.
26. Худякова М.А., Шульженко Е.Б. Свертывающая система крови при 12-суточной водной иммерсии и профилактическая роль вращений на центрифуге // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1977. Т. 11. № 3. С. 79–81.
- Khudyakova M.A., Shulzhenko E.B. The blood clotting system at 12-day water immersion and the preventive role of rotations on a centrifuge // *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina.* 1977. V. 11. № 3. P. 79–81.
27. Кириченко Л.Л., Смирнов В.В., Евдокимова А.Г. Состояние микроциркуляции и клеточного гемостаза у мужчин с пограничной артериальной гипертензией в условиях термонеutralной «сухой» водной иммерсии // *Косм/ биология.* 1985. Т. 19. № 5. С. 35–38.
- Kirichenko L.L., Smirnov V.V., Evdokimova A.G. The state of microcirculation and cellular hemostasis in men with borderline arterial hypertension under conditions of thermoneutral «dry» water immersion // *Kosmicheskaya biologiya.* 1985. V. 19. № 5. P. 35–38.
28. Орлов В.Н., Кириченко Л.Л., Юнусов М.А. Состояние плазменных факторов свертывания крови и

изменение фибринолиза в условиях термонеutralной водной иммерсии у лиц с пограничной артериальной гипертензией // Косм. биология. 1983. Т. 17. № 1. С. 45–48.

Orlov V.N., Kirichenko L.L., Yunusov M.A. The state of plasma coagulation factors and changes in fibrinolysis under conditions of thermoneutral water immersion in persons with borderline arterial hypertension // Kosmicheskaya biologiya. 1983. V. 17. № 1. P. 45–48.

29. Кузичкин Д.С., Маркин А.А., Журавлева О.А. и др. Исследование плазменного компонента системы регуляции агрегатного состояния крови у испытуемых в эксперименте с 21-суточной «сухой» иммерсией // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 101–104.

Kuzichkin D.S., Markin A.A., Zhuravleva O.A. et al. Study of the volunteers' blood aggregate state regulation system in the experiment with 21-day «dry» immersion // Aviakosmicheskaya i ehkologicheskaya meditsina. 2020. V. 54. № 4. P. 101–104.

30. Генин А.М., Пестов И.Д. Микрогравитация: механизмы и модели // Космическая биология и медицина. Человек в космическом полете. 1997. Т. 3. Кн. 1. М., С. 460–480.

Genin A.M., Pestov I.D. Microgravity: mechanisms and models // Space biology and medicine. Man in space flight. 1997. V. 3. B. 1. Moscow, P. 460–480.

31. Морева Т.И. Исследование периферической гемодинамики методом ультразвуковой доплерографии в условиях 7-суточной иммерсии // Авиакосм. и экол. мед. 2008. Т. 42. № 5. С. 35–40.

Moreva T.I. Study of peripheral hemodynamics by ultrasound dopplerography in conditions of 7-day immersion // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2008. V. 42. № 5. P. 35–40.

32. Beltrami E., Jesty J. The role of membrane patch size and flow in regulating a proteolytic feedback threshold on a membrane: possible application in blood coagulation // Mathematical Biosci. 2001. V. 172. № 1. P. 1–13.

33. Шибеко А.М., Карамзин С.С., Бутилин А.А. и др. Обзор современных представлений о влиянии скорости течения на процесс плазменного свертывания крови // Биологические мембраны. 2009. Т. 26. № 6. С. 443–450.

Shibeko A.M., Karamzin S.S., Butylin A.A. et al. Review of modern ideas about the influence of the flow rate on the process of plasma blood clotting // Biologicheskie membrany. 2009. V. 26. № 6. P. 443–450.

34. Navasolava N.M., Dignat-George F., Sabatier F. et al. Enforced physical inactivity increases endothelial microparticle levels in healthy volunteers // Am. J. of Physiol. Heart and Circ. Physiol. 2010. V. 299. № 2. P. 248–256.

35. Долгов В.В., Свирип П.В. Лабораторная диагностика нарушений гемостаза. М.; Тверь, 2005.

Dolgov V.V., Svirin P.V. Laboratory diagnostics of hemostatic disorders. Moscow; Tver, 2005.

36. Данилейко В.И. Физиологическая реакция организма мелких животных на длительное воздействие поперечного ускорения // Физиол. журнал Академии наук СССР. 1962. № 8. С. 220–230.

Danileiko V.I. Physiological reaction of the organism of small animals to the long-term effect of transverse acceleration // Fiziologicheskii zhurnal Akademii nauk SSSR. 1962. № 8. P. 220–230.

37. Елисеев В.Г., Копяев Ю.Н., Котовский Е.Ф. Влияние перегрузок однократного действия на строение внутренних органов экспериментальных животных // Проблемы космической биологии. М., 1964. Т. 3. С. 297–305.

Eliseev V.G., Kopaev Yu.N., Kotovsky E.F. The effect of single-acting overloads on the structure of the internal organs of experimental animals // Problems of space biology. Moscow, 1964. V. 3. P. 297–305.

38. Петрухин В.Г., Соколова И.М. Патоморфология поперечных перегрузок // Авиационная и космическая медицина. М., 1963. С. 394–397.

Petrukhin V.G., Sokolova I.M. Pathomorphology of transverse overloads // Aviation and space medicine. 1963. Moscow, P. 394–397.

39. Петрухин В.Г. Взаимосвязь физиологических и морфологических нарушений при действии различных видов перегрузок на организм животных // Авиационная и космическая медицина. 1969. Москва, Т. 2. С. 134.

Petrukhin V.G. The relationship of physiological and morphological disorders under the action of various types of overloads on the animal body // Aviation and space medicine. Moscow, 1969. V. 2. P. 134.

40. Федуллова Г.А. Особенности системы гемостаза при воздействии факторов летного труда // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1988. Т. 22. № 3. С. 15–21.

Fedulova G.A. Features of the hemostasis system under the influence of flight labor factors // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1988. V. 22. № 3. P. 15–21.

41. Надирян М.В. Влияние вибрации и радиального ускорения на процесс свертывания крови // Система свертывания крови и фибринолиз. 1975. Т. 1. С. 468.

Nadiryani M.V. Influence of vibration and radial acceleration on the blood clotting process // The coagulation system and fibrinolysis. 1975. V. 1. P. 468.

42. Субботина Л.А. Влияние стресса на агрегатное состояние крови // Авиакосм. и экол. мед. 2008. Т. 42. № 3. С. 34–37.

Subbotina L.A. The influence of stress on the aggregate state of the blood // Aviakosmicheskaya i ehkologicheskaya meditsina. 2008. V. 42. № 3. P. 34–37.

43. Субботина Л.А. Время свертывания эуглобулиновой фракции как экспресс-метод диагностики нарушений агрегатного состояния крови // Авиакосм. и экол. мед. 2006. Т. 40. № 6. С. 52–53.

Subbotina L.A. The coagulation time of the euglobulin fraction as an express method for diagnosing violations of the aggregate state of the blood // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2006. V. 40. № 6. P. 52–53.

44. Кузичкин Д.С., Маркин А.А., Журавлева О.А. и др. Показатели плазменного компонента системы регуляции агрегатного состояния крови в эксперименте с вращением на центрифуге короткого радиуса // Междуна-

научно-исследовательский журнал. 2021. Т. 103. № 1. Ч. 3. С. 52–56.

Kuzichkin D.S., Markin A.A., Zhuravleva O.A. et al. Indices of the blood aggregate state regulation system plasma component in an experiment with rotation on a short-radius centrifuge // *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2021. V. 103. № 1. Pt. 3. P. 52–56.

45. Модин А.Ю. Влияние гравитации на линейную скорость кровотока в различных отделах венозной системы человека // *Авиакосм. и экол. мед.* 2002. Т. 36. № 2. С. 4–6.

Modin A.Yu. The influence of gravity on the linear velocity of blood flow in various parts of the human venous system // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2002. V. 36. № 2. P. 4–6.

46. Dong J.F. Cleavage of ultra-large von Willebrand factor by ADAMTS-13 under flow conditions // *J. of Thrombosis and Haemostasis*. 2005. № 8. P. 1710–1716.

47. Shen F., Kastrup C.J., Liu Y., Ismagilov R.F. Threshold response of initiation of blood coagulation by tissue factor in patterned microfluidic capillaries is controlled by shear rate // *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vasc. Biol.* 2008. V. 28. № 11. P. 2035–2041.

48. Huisman B., Hoore M., Gompfer G., Fedosov D.A. Modeling the cleavage of von Willebrand factor by ADAMTS13 protease in shear flow // *Med. Eng. & Physics*. 2017. V. 48. P. 14–22.

49. Lin J., Sorrells M.G., Lam W.A., Neeves K.B. Physical forces regulating hemostasis and thrombosis: Vessels, cells, and molecules in illustrated review // *Res. Pract. Thromb. Haemost.* 2021. V. 5. № 5. ePub 12548. DOI: 10.1002/rth2.12548.

50. Von Känel R. Acute mental stress and hemostasis: When physiology becomes vascular harm // *Thrombosis Res.* 2015. V. 135. Suppl. 1. P. 52–55.

51. Austin A.W., Wissmann T., von Känel R. Stress and hemostasis: an update // *Seminars in Thrombosis and Hemostasis*. 2013. V. 39. № 8. P. 902–912.

52. Arble E., Arnetz B.B. Anticoagulants and the hemostatic system: a primer for occupational stress researchers // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021. V. 18. № 20. ePub 10626. DOI: 10.3390/ijerph182010626.

53. Bentur O.S., Sarig G., Brenner B., Jacob G. Effects of acute stress on thrombosis // *Seminars in Thrombosis and Hemostasis*. 2018. V. 44. № 7. P. 662–668.

54. Sandrini L., Ieraci A., Amadio P. et al. Impact of acute and chronic stress on thrombosis in healthy individuals and cardiovascular disease patients // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. № 21. ePub 7818. DOI: 10.3390/ijms21217818.

55. Синьков С.В., Заболотских И.Б. Диагностика и коррекция нарушений системы гемостаза. М., 2017.

Sinkov S.V., Zabolotskikh I.B. Diagnostics and correction of hemostasis system disorders. Moscow, 2017.

56. Зубаиров Д.М. Молекулярные основы свертывания крови и тромбообразования. Казань, 2000.

Zubairov D.M. Molecular bases of blood clotting and thrombosis. Kazan, 2000.

57. Eggers A.E. Factor XII (Hageman factor) is a missing link between stress and hypercoagulability and plays

an important role in the pathophysiology of ischemic stroke // *Med. Hypotheses*. 2006. V. 67. № 5. P. 1065–1071.

58. Von Känel R., Dimsdale J.E. Effects of sympathetic activation by adrenergic infusions on hemostasis in vivo // *Eur. J. of Haematology*. 2000. V. 65. № 6. P. 357–369.

59. Hao Z., Jiang X., Sharafeih R. et al. Stimulated release of tissue plasminogen activator from artery wall sympathetic nerves: Implications for stress-associated wall damage // *Stress*. 2005. V. 8. P. 141–149.

60. Majoor C.J., Sneenboer M.M., de Kievit A. et al. The influence of corticosteroids on hemostasis in healthy subjects // *J. Thromb. Haemost.* 2016. V. 14. P. 716–723.

61. Lippi G., Franchini M., Salvagno G.L. et al. Higher morning serum cortisol level predicts increased fibrinogen but not shortened APTT // *J. Thromb. Thrombolysis*. 2008. V. 26. № 2. P. 103–105.

Поступила 06.09.2023

HEMOCOAGULATION SYSTEM IN GROUND EXPERIMENTS SIMULATING THE EFFECTS OF SPACE FLIGHT: BASED ON RUSSIAN RESEARCH MATERIALS

Kuzichkin D.S., Markin A.A., Zhuravleva O.A., Kocherguin A.Yu., Nichiporuk I.A.

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The review presents the results of studying the hemocoagulation system in Soviet and Russian experiments modeling effects of some spaceflight factors on the human organism. The most adequate models of microgravity are head-down bed rest (BR) and immersion. Effects of g-loads were reproduced by rotation on a centrifuge.

In the course of these experiments, the procoagulant, anticoagulant and fibrinolytic activities displayed different trends and dependence on the period of locomotion reduction. In immersion, the procoagulant activity increased, fibrinolytic activity decreased and the anticoagulant potential changed in the either direction. Some data suggest that hypergravity increases the anticoagulant and fibrinolytic activities on the background of hypocoagulation; however, there are also other data suggesting the contrary, i.e. hypergravity leads to hypercoagulation and activation of fibrinolysis. According to investigators, the combination of gravitational loads and limited locomotion decreases the procoagulant activity and increases the fibrinolytic one. Discrepancy between the post-flight and ground-based data is attributed to the impossibility to reproduce in laboratory all the factors that act on the human organism in space flight.

Key words: space medicine, spaceflight factors, hemostasis, immersion, bed rest, g-loads, short-arm centrifuge.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 17–24.

УДК 612.1

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА КАК МАРКЕР РЕГУЛЯТОРНЫХ МЕХАНИЗМОВ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОГО ГОМЕОСТАЗА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ

Русанов В.Б., Яхья Ю.Д., Орлов О.И.

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

E-mail: vasilyrusanov@gmail.com

В статье рассмотрены концепции работы регуляторных механизмов сердечно-сосудистого гомеостаза в космическом полете (КП) и variability сердечного ритма (ВСР) как биомаркера гомеостатических процессов в организме человека. ВСР, представляющая собой колебания временных интервалов между сердечными сокращениями, обусловлена динамическими нелинейными процессами вегетативной нервной системы (ВНС), нейрогуморальным и метаболическим контурами регуляции. Исходя из этого, ВСР может быстро реагировать на изменение потребностей организма в кровоснабжении, являясь качественным показателем уровня его адаптации к различным условиям окружающей среды. ВСР связана не только с ВНС, но и с мозговыми структурами, в том числе и префронтальной корой. Эта связь делает ВСР еще более значимым в качестве комплексного биомаркера, отражающего не только сердечную функцию, но и гибкую адаптивную регуляцию в КП, позволяя оценить как состояние системы кровообращения, так и общее функциональное состояние организма.

Ключевые слова: вегетативная нервная система, variability сердечного ритма гомеостаз, адаптация, механизмы регуляции, космический полет.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 25–31.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-25-31

Для анализа гомеостатических процессов, происходящих в организме человека при экстремальных воздействиях, с одной стороны, необходимо точные инструменты физиологических измерений для определения их направленности. С другой стороны, возможно использование широкого набора аналитических инструментов для оценки биологических параметров, которые называются биомаркерами [1]. Понятие биомаркера включает в себя характеристику, которую можно объективно измерить, и которая может служить в качестве индикатора физиологических и патологических биологических процессов [2].

Использование анализа структуры сердечного ритма и его variability, как биомаркера адаптационных процессов в системе кровообращения, в

России связано с исследованием функциональных состояний организма человека в космическом полете (КП) [3].

Основоположником школы математического анализа variability сердечного ритма (ВСР), в российской космической биологии и медицине, Р.М. Баевским (1928–2020) были сформулированы основные концептуальные идеи этого направления [4].

Одной из таких концепций является двухконтурная модель регуляции сердечного ритма [5]. Она представляет собой 2 взаимосвязанных между собой контура: центральный и автономный (рис. 1). К структурам автономного контура относятся узел Кис – Флака (синоатриальный узел), 10-я пара черепно-мозговых нервов (блуждающий нерв) с ядрами, расположенными в продолговатом мозге. Индикатором активности автономного контура является дыхательная синусовая аритмия. В свою очередь индикатором центрального контура является недыхательная аритмия. Также для центрального контура характерны медленноволновые компоненты сердечного ритма. Через нервные (предпочтительно симпатические) и гуморальные компоненты регуляции осуществляется прямая и, соответственно, обратная связь между контурами. Однако афферентные импульсы от интерорецепторов сердца и сосудов (баро-, хеморецепторы, рецепторные зоны тканей и органов) имеют немаловажное значение для осуществления обратной связи. Автономный контур в состоянии покоя сопровождается выраженной дыхательной аритмией, при этом влияние центрального контура ослабевает. Фактически автономный контур связан с парасимпатическими модулирующими влияниями вегетативной нервной системы (ВНС). При стрессе и любых других реакциях организма усиливается нереспиаторный компонент синусовой аритмии, происходит вовлечение в регуляцию сердечного ритма центрального контура. В регуляторном механизме начинают преобладать симпатические влияния.

ВСР как колебания временных интервалов между последовательными сердечными сокращениями

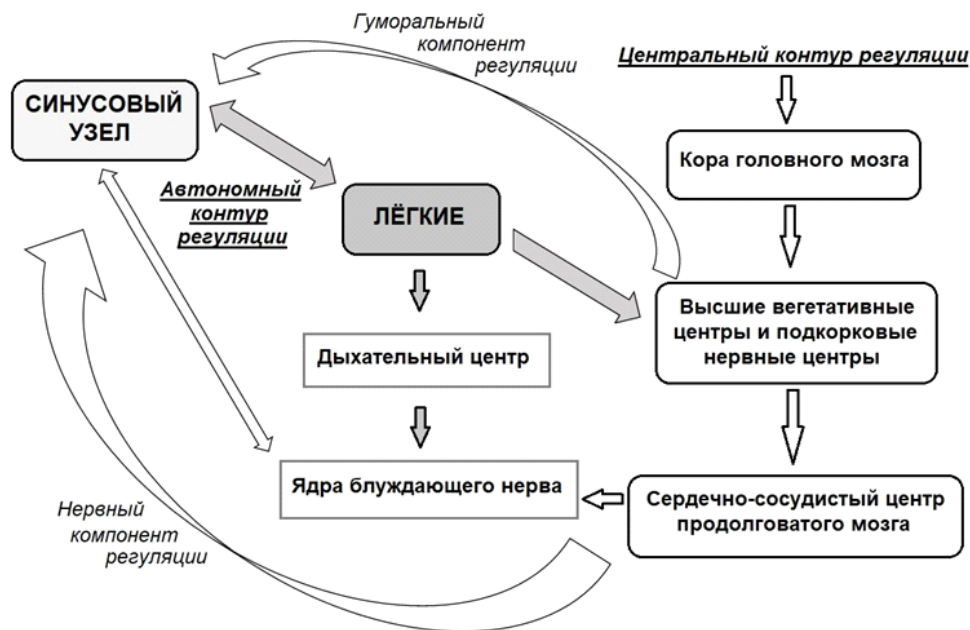


Рис. 1. Двухконтурная модель регуляции сердечного ритма (Баевский Р.М., 1979)

генерируется динамическими нелинейными процессами вегетативной нервной системы, центральными механизмами, нейрогуморальным и метаболическим контурами регуляции и, таким образом, отражает взаимодействие систем регулирования, обеспечивающих процессы адаптации. Эти взаимодействия в здоровом сердце являются сложными и постоянно меняющимися, что позволяет регуляторным механизмам сердечно-сосудистой системы быстро адаптироваться к внешним условиям и поддерживать гомеостаз. Важная парадигма ВСР основана на концепциях Клода Бернара (1813–1878) и Уолтера Брэдфорда Кэннона (1871–1945) о «внутренней среде организма» и «гомеостазе». Стабильный гомеостаз, согласно этой парадигме, связан с повышенной вариабельностью ВСР [6].

Изменения ритма сердечных сокращений являются индикатором изменения активности нервных и гуморальных механизмов регуляции, а в характеристиках вариабельности кардиоинтервалов заключена информация о работе регуляторных систем организма. Вместе с тем в результате регуляторных влияний ритм сердца способен быстро реагировать на изменения потребности организма в кровоснабжении [7].

Уровень развития методологии ВСР, существующий на сегодняшний день, позволяет использовать ее как комплексный биомаркер, отражающий сложные процессы не только в системе кровообращения, но и организма в целом. Поскольку ВСР определяется не только динамической модуляцией вагусного контроля сердечного ритма [8], но и, посредством проекций через несколько лимбических

структур и структур ствола мозга, связана с влиянием префронтальной коры [9], она может характеризовать уровень функционального состояния, а также индивидуальные признаки, связанные с физическим и психическим здоровьем [10].

В ВСР находят отражение не только механизмы, обеспечивающие гомеостаз за счет внутренних процессов на вегетативном уровне организма, но и механизмы, поддерживающие гомеостаз за счет изменения системного взаимодействия с внешним миром, лежащие в основе способности к саморегуляции и сложных поведенческих процессов [11].

Гипотеза, лежащая в основе концептуализации ВСР как биомаркера гомеостатических процессов в организме, состоит в том, что ритм сердца и его динамика не только показатель сердечной функции, но и показатель гибкой адаптивной регуляции [12]. Это согласуется с концепцией анализа функциональных состояний организма и используемых для оценки адаптационных процессов в КП [13].

Совокупность факторов космического полета требует от организма человека постоянного напряжения систем регуляции для поддержания гомеостаза [14]. Сложное комплексное воздействие стрессовых факторов приводит к тому, что в процесс адаптации вовлекаются все более высокие уровни управления физиологическими функциями организма [15, 16]. Это обеспечивает необходимую координацию различных систем и процессов в рамках единой цели — уравнивания организма с окружающей средой [17].

Морфометрические исследования мозга демонстрируют структурные корреляты между участками

префронтальной коры, стволom мозга, вегетативной нервной системой и ВСР [12].

В исследованиях с использованием нейровизуализации с помощью позитронно-эмиссионной томографии [18] или функциональной магнитно-резонансной томографии [19] показана степень функциональной интеграции ВСР с мозгом, связанная с поведенческими, умственными заданиями или эмоциональными стимулами, которые влияют на вегетативный контроль сердечной деятельности в зависимости от исходного уровня ВСР [20] или реакции ВСР при выполнении задания в сканере [21].

Именно за счет объединения мозговых и вегетативных механизмов, а также активации высших нервных центров ВСР может служить индикатором качества адаптации к условиям космической среды, что в итоге определяет уровень здоровья космонавта [17, 22].

Нетипичные для организма условия существования (такие как невесомость), моделируют специфические взаимоотношения внутри регуляторных механизмов. Основой этого процесса являются динамически меняющиеся во времени и пространстве структурные и функциональные сети, обеспечивающие многоуровневые взаимодействия в целостном организме [23]. Подход к определению функциональных состояний с точки зрения динамических сетей позволил выявить новые аспекты связей между сердцем и мозгом [24]. В частности, Piper et al. использовали анализ изменяющейся во времени когерентности для количественной оценки роли нейронных сетей в симпатическом контроле сердца [25].

Взаимодействие сердечно-сосудистой системы с вегетативной нервной системой и центральной нервной системой (ЦНС) осуществляется за счет рефлекторных дуг и модулирующего действия на них корковых сетей. Несмотря на некоторую автономность вегетативных рефлексов, на вегетативную нервную систему, в первую очередь, влияет «центральная вегетативная сеть» мозга (*central autonomic network*). Центральная вегетативная сеть – это концептуальная модель, основанная на двустороннем интегрированном взаимодействии мозга и сердца. Она представляет собой сложную сеть областей ствола и переднего мозга, которые участвуют как в поддержании вегетативного тонуса, так и в модуляции функций ВНС в ответ на изменение окружающей среды [26]. Центральная вегетативная сеть образована структурами, модулирующими вегетативный баланс, состоит из взаимосвязанных областей, распределенных по центральной нервной оси, которые связывают ядра ствола мозга, непосредственно регулирующие работу сердца со структурами переднего мозга через петли прямой и обратной связи. Эти области включают ядро солитарного тракта, ядра шва, медуллярные промежуточные

ретикулярные ядра, парабрахияльное ядро и ядро Баррингтона (центр стимуляции тазовых органов). Области верхнего моста и среднего мозга интегрируют вегетативный контроль с модуляцией боли, реакцией на стресс, поведенческим возбуждением и двигательными реакциями. Они включают околопроводное серое вещество, педункуло-понтинное ядро покрышки и голубое пятно. Гипоталамус функционирует как генератор паттернов интегрированных вегетативных, эндокринных и поведенческих реакций, обеспечивающих системный гомеостаз и адаптацию к окружающей среде. Гипоталамический вегетативный выход осуществляется в основном из паравентрикулярного ядра, дорсомедиального ядра и латеральной области гипоталамуса, включая группу нейронов, которые синтезируют орексин (гипокретин). Основными областями конечного мозга, контролирующими вегетативную функцию, являются миндалевидное тело, островковая кора, передняя и средняя поясная кора, префронтальная кора (рис. 2) [27, 28].

Согласно модели «нейровисцеральной интеграции» [29] именно нейронные «структуры центральной вегетативной сети», взаимодействуя между собой, обеспечивает адаптивное регулирование, а ВСР является показателем степени достижения равновесия между организмом человека и окружающей средой и легко измеряемым выходным сигналом (маркером) этой нейронной сети.

Модуляция ВСР «центральной вегетативной сетью» осуществляется путем ее нисходящих влияний на преганглионарные симпатические и парасимпатические нейроны, осуществляющие контроль сердца через звездчатые ганглии и блуждающий нерв соответственно [30, 31, 32]. Хотя оба компонента вегетативной нервной системы влияют на частоту сердечных сокращений, считается, что парасимпатическая нервная система оказывает более быстрое и преобладающее влияние на ВСР в покое [33].

Фундаментальным принципом нейросетевого контроля ВСР является его иерархическая организация со структурами коры, обеспечивающими тормозной контроль над лимбическими и стволовыми симпато-возбудительными и кардиоускорительными цепями [34]. Нижние уровни иерархии «центральной вегетативной сети» осуществляют обработку поступающей информации из различных телесных источников на уровне ядер ствола мозга и подкорковых областей [35]. Более высокие уровни иерархии, интегрируют информацию об экстероцепции и интероцепции с процессами памяти с учетом ожидаемых метаболических потребностей, которые связаны с долгосрочными целями. [36]. Поскольку восходящие сигналы от висцеральных органов представляют собой непрерывные внутренние стимулы, они постоянно достигают корковых и подкорковых областей, способствуют

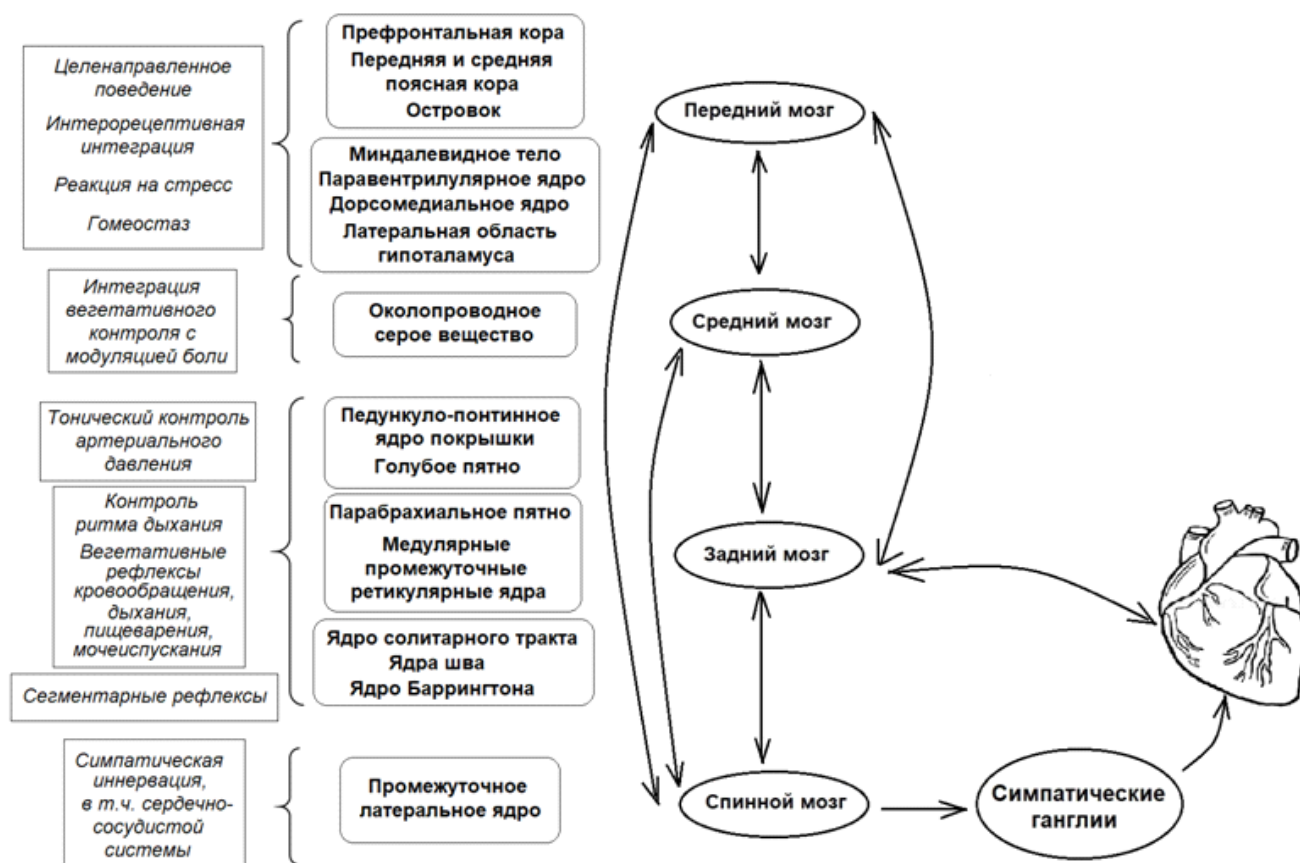


Рис. 2. Центральная вегетативная сеть: иерархическая организация и взаимосвязи (Benarroch E.E., 1993; Shouman K., Benarroch E.E., 2021).

Парасимпатический выход опосредован главным образом дорсальным ядром блуждающего нерва (вегетативным) и двойным ядром – общим для языкоглоточного и блуждающего нервов (двигательным). Симпатический выход в основном опосредован промежуточным латеральным ядром (VII пластина по Рекседу с восьмого шейного по второй поясничный (C8–L2) сегменты спинного мозга)

формированию спонтанной мозговой активности и внутренних мозговых сетей [37].

Нарушение префронтальной активности приводит к растормаживанию симпатическо-возбудительных цепей, в результате чего увеличивается частота сердечных сокращений и снижается вагусно-опосредованная ВСР [38]. Кроме того, левосторонние структуры переднего мозга, по-видимому, преимущественно участвуют в регуляции парасимпатического тонуса, тогда как правосторонние структуры контролируют симпатический тонус [39, 40].

Нерегулярность ВСР и его низкоразмерная хаотическая динамика [41, 42] связаны с нормальной физиологической деятельностью сердца. При ее нарушении хаотичность ВСР уменьшается [43], а динамика ВСР упрощается и снижается [44, 45].

Профессиональные космические экипажи формируются из специально отобранных, практически здоровых людей, обученных работать в измененных условиях и в постоянном стрессе [46]. Мониторинг их функционального состояния основан на оценке

изменений в пределах физиологической нормы, где основными являются, сдвиги (перестройки), происходящие в механизмах регуляции и развивающиеся на информационно-временном или информационно-энергетическом уровнях организма [13]. В этом смысле индивидуальный подход космической медицины к оценке здоровья можно рассматривать как предпосылку современной персонализированной медицины [47].

ВСР дает представление об адапционных процессах к условиям космической среды за счет интеграции мозговых и вегетативных процессов и активации высших вегетативных центров, что в конечном итоге определяет уровень здоровья космонавта. Для сохранения сердечно-сосудистого гомеостаза на оптимальном уровне необходима активная перестройка регуляторных механизмов. На разных стадиях адаптации организма к условиям микрогравитации меняется степень напряжения регуляторных систем и их функциональные резервы, а сам адапционный процесс связан с постепенным

усилением влияния более высоких уровней регуляции [48].

Таким образом, в контексте физиологической регуляции ВСР может быть больше, чем просто показатель сердечной деятельности. Она является маркером того, каким образом и в какой степени «интегративная» система адаптивного регулирования мозга обеспечивает гибкий контроль над периферией, когда несколько процессов влияют друг на друга. Взаимно ограничивая друг друга эти процессы позволяют всей системе спонтанно колебаться в диапазоне состояний и гибко реагировать на изменение афферентной информации. Система, которая «заперта» на определенном паттерне, не регулируется. Частота сердечных сокращений здорового сердца колеблется спонтанно, т. е. показывает высокую ВСР, поскольку система ее регуляции сбалансирована. Поэтому она может реагировать на требования окружающей среды [49]. Демонстрируя сложные образцы изменчивости, ВСР обеспечивает высокую адаптивность [50], позволяющую быстро справляться с вызовами неопределенной и изменяющейся среды, поддерживать гомеостатические процессы и предоставить ценную информацию о способности организма эффективно функционировать в условиях невесомости.

Выводы

1. ВСР является показателем адаптивной регуляции, позволяя оценить общее функциональное состояние организма космонавта в КП.
2. ВСР характеризует адаптационный процесс не только на количественном, но и на качественном уровне.
3. ВСР как интегративная характеристика, отражает взаимосвязь между различными уровнями регуляции от периферического до центрального.
4. Использование ВСР в оценке адаптационных процессов у космонавтов можно рассматривать как предпосылку современной персонализированной медицины.

Работа выполнена по теме РАН на 2024–2026 гг. FMFR-2024–0042.

Список литературы

1. Gambhir S.S., Ge T.J., Vermesh O., Spitler R., Gold G.E. Continuous health monitoring: An opportunity for precision health. *Sci. Transl. Med.* 2021.13,
2. Hoefner D.M. Biomarkers Definitions Working Group. Biomarkers and surrogate endpoints: preferred definitions and conceptual framework / D.M. Hoefner // *Clin. Pharmacol. Ther.* 2001. Vol. 69. P. 89–95.
3. Parin V.V., Baevsky R.M., Gazenko O.G. Heart and circulation under space conditions // *Cor. et Vasa.* 1965. V. 7. № 3. P. 165–184.
4. Баевский Р.М. Физиологические измерения в космосе и проблема их автоматизации. М., 1970. 253 с.
Baevskij R.M. Physiological measurements in space and the problem of their automation. M., 1970. 253 p.
5. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М., 1979. 205 с.
Baevskij R.M. Prediction of conditions on the border between normal and pathological. M., 1979. 205 p.
6. Goldberger A.L. Fractal variability versus pathologic periodicity: complexity loss and stereotypy in disease. *Perspect. Biol. Med.* 1997. 40(4):543–61.
7. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. *Вестник аритмологии.* 2001. 24. С. 69–85.
Baevskij R.M., Ivanov G.G., Chirejkin L.V. et al. Analysis of heart rate variability using various electrocardiographic systems. *Vestnik aritmologii.* 2001. V. 24. P. 69–85.
8. List Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task force of the European society of cardiology and the North American society of pacing and electrophysiology (membership of the task force listed in the appendix). *Eur. Heart J.* 1996. 17, 354–381.
9. Thayer J.F., Hansen A.L., Saus-Rose E., Johnsen B.H. Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health. *Ann. Behav. Med.*, 37. 2009. P. 141–153.
10. Holzman J.B., Bridgett D.J. Heart rate variability indices as biomarkers of top-down self-regulatory mechanisms: a meta-analytic review. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. 74: 233–55.
11. Porges S.W., Furman S.A. The early development of the autonomic nervous system provides a neural platform for social behavior: a polyvagal perspective. *Infant. Child. Dev.* 2011. 20(1):106–18.
12. Thayer J.F., Ahs F., Fredrickson M., Sollers J.J. III, Wager T.D. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2012. 36: 747–56.
13. Baevsky R.M., Chernikova A.G., Funtova I.I., Tank J. Assessment of individual adaptation to microgravity during long term space flight based on stepwise discriminant analysis of heart rate variability parameters. *Acta Astronaut.* 2011. 69, P. 1148–1152.
14. Baevsky R.M., Funtova I.I., Luchitskaya E.S., Chernikova A.G., The effects of long-term microgravity on autonomic regulation of blood circulation in crewmembers of the International Space Station, *Cardiometry.* 2014. 5, P. 35–49.
15. Baevsky R.M., Baranov V.M., Funtova I.I., Pashenko A.V., Chernikova A.G., Jordan J., Tank J., Diedrich A., Drescher J. Autonomic cardiovascular and respiratory control

during prolonged spaceflights aboard the international space station. *J. of Appl. Physiol.* 2007. 103 (1). P. 156–161.

16. *Baevsky R.M., Funtova I.I., Chernikova A.G., Baranov V.M., Tank J., Diedrich A., Drescher J.* Autonomic function testing aboard the ISS using «Pneumocard». *Acta Astronautica*. 2009. 65. P. 930–932.

17. *Баевский Р.М., Черникова А.Г.* Оценка адаптационного риска в системе индивидуального донозологического контроля. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. Т. 100. № 10. 2014. С. 1180–1194.

Baevskij R.M., Chernikova A.G. Assessment of adaptation risk in the system of individual prenosological control. *Rossiiskij fiziologicheskij zhurnal imeni I.M. Sechenova*. V. 100. № 10 2014. P. 1180–1194.

18. *Gianaros P.J., Van Der Veen F.M., Jennings J.R.* Regional cerebral blood flow correlates with heart period and high-frequency heart period variability during working-memory tasks: implications for the cortical and subcortical regulation of cardiac autonomic activity. *Psychophysiology*. 2004. 41. P. 521–530.

19. *Napadow V., Dhond R., Conti G., Makris N., Brown E.N., Barbieri R.* Brain correlates of autonomic modulation: combining heart rate variability with fMRI. *Neuroimage*. 2008. 42. P. 169–177.

20. *Neumann S.A., Brown S.M., Ferrell R.E., Flory J.D., Manuck S.B., Hariri A.R.* Human choline transporter gene variation is associated with corticolimbic reactivity and autonomic-cholinergic function. *Biol. Psychiatry*. 2006. 60. P. 1155–1162.

21. *Chand T., Li M., Jamalabadi H., Wagner G., Lord A., Alizadeh S., Danyeli L.V., Herrmann L., Walter M., Sen Z.D.* Heart Rate Variability as an Index of Differential Brain Dynamics at Rest and After Acute Stress Induction. *Front. Neurosci.* 2020. 14:645.

22. *Baevsky R.M., Chernikova A.G.* Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods. *Cardiometry*. 2017. 10, P. 66–76.

23. *Ivanov P.Ch., Liu K.K.L., Bartsch R.P.* Focus on the emerging new fields of network physiology and network medicine. *New J. Phys.* 2016. 18:100201.

24. *Valenza G., Toschi N., and Barbieri R.* Uncovering brain–heart information through advanced signal and image processing. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2016. 374(2067):20160020.

25. *Piper D., Schiecke K., Pester B., Benninger F., Feucht M. Witte H.* Time-variant coherence between heart rate variability and EEG activity in epileptic patients: an advanced coupling analysis between physiological networks *New J. Phys.* 2014. 16 115012.

26. *Sklerov M., Dayan E., Browner N.* Functional neuroimaging of the central autonomic network: recent developments and clinical implications. *Clin. Auton. Res.* 2019.29, 555–566.

27. *Benarroch E.E.* The central autonomic network: functional organization, dysfunction, and perspective. *Mayo. Clin. Proc.* 1993. 68, 988–1001.

28. *Shouman K., Benarroch E.E.* Central Autonomic Network. *Autonomic Nervous System and Sleep*. 2021. P. 9–18.

29. *Thayer R.D., Lane A.* Model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation *J. Affect. Disord.* 2000. 61. P. 201–216.

30. *Saper C.B.* The central autonomic nervous system: conscious visceral perception and autonomic pattern generation. *Annu. Rev. Neurosci.* 2002. 25. P. 433–469.

31. *Thayer J.F., Sollers J.J., Labiner D.M., Weinand M., Herring A.M., Lane R.D., Ahern G.L.* Age-related differences in prefrontal control of heart rate in humans: a pharmacological blockade study *Int. J. Psychophysiol.* 2009. 72. P. 81–88.

32. *Palma J.A., Benarroch E.E.* Neural control of the heart: recent concepts and clinical correlations. *Neurology*. 2014. 83. P. 261–271.

33. *Berntson G.G., Bigger J.T.Jr., Eckberg D.L., Grossman P., Kaufmann P.G., Malik M. et al.* Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. 1997. 34(6):623–48.

34. *Thayer J.F., Sternberg E.* Beyond heart rate variability: vagal regulation of allostatic systems. *Ann. NY Acad. Sci.* 2006. Nov; 1088: 361–72.

35. *Smith R., Thayer J.F., Khalsa S.S., Lane R.D.* The hierarchical basis of neurovisceral integration. *Neurosci. Biobehav.* 2017. Rev. 75. P. 274–296.

36. *Dehaene S.* Consciousness and the brain: deciphering how the brain codes our thoughts. *J. Undergrad. Neurosci. Educ.* 2014. 12, R5–R6.

37. *Kim H.C., Tegethoff M., Meinlschmidt G., Stalujanis E., Belardi A., Jo S. et al.* Mediation analysis of triple networks revealed functional feature of mindfulness from real-time fMRI neurofeedback. *NeuroImage*. 2019. 195. P. 409–432.

38. *Ahern G.L., Sollers J.J., Lane R.D., Labiner D.M., Herring A.M., Weinand M.E. et al.* Heart rate and heart rate variability changes in the intracarotid sodium amobarbital test. *Epilepsia*. 2001. 42. P. 912–921.

39. *Craig A.D.* Forebrain emotional asymmetry: a neuroanatomical basis? *Trends Cogn. Sci.* 2005. 9. P. 566–571.

40. *Guo C.C., Sturm V.E., Zhou J., Gennatas E.D., Trujillo A.J., Hua A.Y. et al.* Dominant hemisphere lateralization of cortical parasympathetic control as revealed by frontotemporal dementia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. 113, E2430–E2439.

41. *Barahona M., Poon C.S.* Detection of nonlinear dynamics in short, noisy time series. *Nature*. 1996. vol. 381, no. 6579. P. 215–217.

42. *Elbert T., Ray W.J., Kowalik Z., Skinner J., Graf K.E., Birbaumer N.* Chaos and physiology: Deterministic chaos in excitable cell assemblies, *Physiol. Rev.* 1994. V. 74. N. 1. P. 1–47.

43. *Ivanov P.C., Amaral L.A. N., Goldberger A.L., Havlin S., Rosenblum M.G., Struzik Z.R., Stanley H.E.* Multifractality in human heartbeat dynamics. *Nature*. 1999. V. 399. N. 6735. P. 461–465.

44. *Ишбулатов Ю.М., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Киселев А.Р., Сергеев С.А., Селезнев Е.П., Безручко Б.П., Прохоров М.Д.* Фазовая синхронизация колебаний контуров вегетативной регуляции кровообращения в математической модели сердечно-сосудистой системы. *Нелинейная динамика*. 2017. Т. 13. № 3. С. 381–397.

Ishbulatov Ju.M., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I., Kiselev A.R., Sergeev S.A., Seleznev E.P., Bezruchko B.P., Prohorov M.D. Phase synchronization of oscillations of autonomic regulation of blood circulation in a mathematical model of the cardiovascular system. *Nelinejnaja dinamika*. 2017. V. 13. № 3. P. 381–397.

45. Сказкина В.В., Киселев А.Р., Боровкова Е.И., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С. Оценка синхронизованности контуров вегетативной регуляции кровообращения по длительным временным рядам. *Нелинейная динамика*. 2018. Т. 14. № 1. С. 3–12.

Skazkina V.V., Kiselev A.R., Borovkova E.I., Ponomarenko V.I., Prohorov M.D., Karavaev A.S. Assessment of the synchronization of the circuits of autonomic regulation of blood circulation using long-term time series. *Nelinejnaja dinamika*. 2018. V. 14. № 1. P. 3–12.

46. Kovacs G., Shadden M. Analysis of age as a factor in NASA astronaut selection and career landmarks. *PLoS ONE*. 2017. 12(7):e0181381.

47. Pavez L.E., Baatout S., Choukér A., Buchheim J.-I., Baselet B., Dello Russo C., Wotring V., Monici M., Morbidelli L., Gagliardi D., Stingl J.C., Surdo L., Yip V.L.M. The Future of Personalized Medicine in Space: From Observations to Countermeasures. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021. 9:739747.

48. Baevsky R.M., Moser M., Nikulina G.A., Polyakov V.V., Funtova I.I., Chernikova A.G. Autonomic regulation of circulation and cardiac contractility during a 14-month space flight. *Acta. Astronaut.* 1998. 42. 159–173.

49. Thayer J.F., Sternberg E.M. Neural concomitants of immunity. Focus on the vagus nerve. *Neuroimage*. 2009. 47, 908–910.

50. Beckers F., Verheyden B., Aubert A.E. Aging and nonlinear heart rate control in a healthy population. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2006 290:H2560–70.

HEART RATE VARIABILITY AS A MARKER OF REGULATORY MECHANISMS OF CARDIOVASCULAR HOMEOSTASIS IN SPACE FLIGHT

Rusanov V.B., Yakhya Yu.D., Orlov O.I.

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The article discusses the concepts of the work of regulatory mechanisms of cardiovascular homeostasis in space flight (SF) and heart rate variability (HRV) as a biomarker of homeostatic processes in the human body. HRV, which is fluctuations in time intervals between heartbeats, is caused by dynamic nonlinear processes of the autonomic nervous system (ANS), neurohumoral and metabolic regulatory circuits. Thus, HRV can quickly respond to changes in the body's blood supply needs, being a qualitative indicator of the level of its adaptation to various environmental conditions. HRV is connected not only with the ANS, but also with brain structures, including the prefrontal cortex. This connection makes HRV even more significant as a complex biomarker, reflecting not only cardiac function, but also flexible adaptive regulation in the SF, allowing one to assess both the state of the circulatory system and the general functional state of the body.

Key words: autonomic nervous system, heart rate variability, homeostasis, adaptation, regulatory mechanisms, space flight.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 25–31.

Поступила 17.07.2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 523.34+539.1.047+613.648.4+613.693+614.876

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ УРОВНЕЙ ОБЛУЧЕНИЯ КОСМОНАВТОВ ПРИ КРАТКОСРОЧНОЙ ЛУННОЙ МИССИИ

Иванов И.В.^{1, 2}, Бурмистров В.И.^{2, 3}, Маткевич Е.И.³

¹Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины МО РФ, Санкт-Петербург

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), Москва

³Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

E-mail: ivanov-iv@yandex.ru

Определены вероятные дозовые нагрузки на космонавтов при краткосрочной лунной миссии на этапах космического полета и на поверхности Луны по данным измерений, а также по результатам модельных расчетов для краткосрочной лунной миссии.

Установлено, что дозы облучения космонавтов за 21-суточную лунную миссию с пребыванием на Луне в течение 14 сут в период минимальной солнечной активности составят около 130 мЗв, но при максимальной солнечной активности и в случае солнечной вспышки дозы облучения по данным измерений могут достигать 9–12 Зв при максимально допустимых 250 мЗв за 1 мес. Увеличение массовой толщины противорадиационной защиты командного модуля в эквиваленте алюминия с 10 до 20 г/см² и лунного скафандра в эквиваленте алюминия с 0,2 до 0,5–1,0 г/см² позволит в 1,4 раза снизить общую дозу облучения космонавтов за краткосрочную лунную миссию в период минимальной солнечной активности.

Для минимизации облучения космонавтов в ходе лунной миссии необходимо учитывать прогноз солнечной активности для оптимизации времени старта космического аппарата в «окна», когда для внешнего радиационного пояса Земли характерны минимальные потоки высокоэнергетических электронов, а также с учетом состояния космической погоды на трассе полета к Луне.

Ключевые слова: космические полеты, космонавты, Луна, краткосрочная лунная миссия, солнечная активность, дозы облучения, противорадиационная защита.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 32–46.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-32-46

Более полувека назад человек смог оказаться на Луне. Первые астронавты (командир корабля Нил Армстронг) ступили на поверхность Луны в июле 1969 г. в Море Спокойствия, пробыли на поверхности 2 ч 24 мин и преодолели по ее поверхности расстояние 250 м. Вторая высадка людей на Луну (командир корабля Чарльз Конрад) произошла в ноябре 1969 г.

в Океане Бурь; астронавты пробыли на поверхности спутника 7,5 ч, преодолев расстояние 2 км.

В последние годы ведущие страны мира снова устремляют свой взор к спутнику Земли, желая вновь покорить его. Предполагается использовать Луну в качестве полигона для проведения научных экспериментов в областях планетологии, астрономии, космологии, космической биологии, тестирования космических технологий для полетов на Марс и другие планеты, в том числе для обеспечения стартов космических кораблей в межпланетные и межзвездные полеты. Планируется использовать естественный спутник Земли как ресурсную базу для добычи полезных ископаемых – редкоземельных металлов, гелия, воды, кислорода, запасов энергии и др. Для этого необходимо будет обустривать лунные поселения, которые обеспечат возможность длительной работы космонавтов на будущих лунных базах.

С какими проблемами могут столкнуться участники будущих экспедиций? Воздействие на человека радиации, невесомости, гипогравитации, солнечной инсоляции и низких температур, химического состава лунной пыли, длительное воздействие замкнутого пространства – эти и другие вопросы уже давно решаются в многочисленных научных учреждениях мира.

Многие исследования посвящены оценке доз облучения космонавтов при орбитальных полетах вокруг Земли как на космической станции [1–6], так и при нахождении в скафандре при внекорабельной деятельности [7], в том числе с применением методов математического моделирования [8–10]. Однако недостаточно изученным остается вопрос оценки характерных для разных этапов полета и пребывания на поверхности Луны доз ионизирующего космического излучения и их соотношения с нормативами радиационной безопасности для персонала.

Цель исследования – выполнить расчеты возможных доз облучения космонавтов на основных этапах выполнения краткосрочной лунной миссии.

Методика

В ходе исследования выполнена систематизация материалов по уровням дозовой нагрузки на космонавтов на этапах космического полета и на поверхности Луны. При этом использованы данные анализа дозиметрических измерений, а также результаты методов статистического моделирования с учетом солнечной активности (СА) в условиях краткосрочного 21-суточного космического полета с пребывания на лунной поверхности в течение 14 сут. Для оценки доз облучения на основе прямых измерений использованы результаты, полученные со спутников на геостационарных орбитах, на орбите Луны и на лунной поверхности, результаты математического моделирования, основанные на статистических данных многолетних наблюдений за космической радиационной обстановкой в условиях минимума и максимума 11-летних циклов СА. При этом расчеты поглощенной дозы радиации с заданным доверительным уровнем осуществляются для телесного угла 4 внутри сферы из алюминия с помощью стандартных программ COSRAD и SPENVIS. При расчете задается доверительный уровень, как степень достоверности того, что реальные значения дозы не будут превышать рассчитанные.

Эквивалентную дозу ионизирующего излучения рассчитывали как произведение поглощенной дозы излучения в биологической ткани на коэффициент качества (взвешивающий коэффициент) этого излучения. Коэффициент качества ионизирующего излучения зависит от линейной передачи энергии (ЛПЭ) заряженных частиц в воде. Его значения (для линейной передачи энергии в воде) были приведены в ГОСТ 15484-81 [11] и составляли 1 (≤ 35 кэВ/мкм), 2 (7,0 кэВ/мкм), 5 (23 кэВ/мкм), 10 (53 кэВ/мкм), 20 (≥ 175 кэВ/мкм). Значение коэффициента качества для промежуточных значений ЛПЭ находят путем линейного интерполирования между указанными значениями коэффициента для данного интервала ЛПЭ. В соответствии с Публикацией 60 МКРЗ [12] при оценках эквивалентной дозы рекомендовано использовать коэффициенты качества Q_{ICRP60} , зависящие от ЛПЭ излучения, которые рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} Q_{ICRP60} &= 1,0 \text{ для } L \leq 10,0 \text{ кэВ/мкм;} \\ Q_{ICRP60} &= 0,32 \cdot L - 2,2 \\ &\text{для } 10,0 \text{ кэВ/мкм} < L \leq 100,0 \text{ кэВ/мкм;} \\ Q_{ICRP60} &= 300,0 / \sqrt{L} \text{ для } L > 100,0 \text{ кэВ/мкм.} \end{aligned}$$

где L – линейная передача энергии (ЛПЭ) в воде, кэВ/мкм.

Согласно СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» [13], взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) – это используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения (R) в индуцировании биологических эффектов, при этом W_R составляют для фотонов любых энергий – 1, электронов и мюонов любых энергий – 1, нейтронов с энергией менее 10 кэВ – 5, от 10 до 100 кэВ – 10, от 100 кэВ до 2 МэВ – 20, от 2 до 20 МэВ – 10, более 20 МэВ – 5, для протонов с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи, – 5, альфа-частиц, осколков деления и тяжелых ядер – 20.

При расчете эквивалентных доз важно понимать, что коэффициенты качества космического излучения определяются сложной структурой космического излучения как по его многокомпонентному составу, так и по энергетическим характеристикам, которые постоянно изменяются во времени в зависимости от СА, уровней галактического излучения на данный момент измерений, зависят от высоты орбиты станции, места расположения дозиметра на космическом корабле, глубины залегания критического органа или ткани и т. д. Так, оценка среднемесячных значений коэффициента качества космического излучения в течение полугода на космической станции показала, что они меняются в зависимости от цикла СА на 35 %, от глубины залегания критического органа на 25 % и от места на станции на 25 % [10]. Поэтому при расчете эквивалентных доз от поглощенных многие авторы [9, 14–16] используют усредненные интегральные значения коэффициента качества для определенной области космического пространства.

В данном исследовании закономерности формирования эквивалентной дозы облучения для космонавтов при полете космического аппарата (КА) к Луне рассматриваются для 2 периодов – пересечения радиационных поясов Земли (РПЗ) и движения на межпланетной траектории к Луне и обратно. С учетом отличий космического излучения на этих этапах полета по своему составу и энергетическому распределению различных его компонентов средние значения взвешивающих коэффициентов W_R при переходе от поглощенной к эквивалентной дозе для условий полета на околоземных орбитах соответствуют значениям 1,5–3,6 [9, 15], а для космического пространства, поверхности и орбиты Луны W_R соответствуют значениям $4,3 \pm 0,7$ [16]. Отдельные авторы [14] для суммарного эквивалента дозы галактического излучения на кожу на поверхности Луны W_R оценивают в 7,7.

При выполнении расчетов учитывали, что после старта КА вывод его за пределы магнитосферы

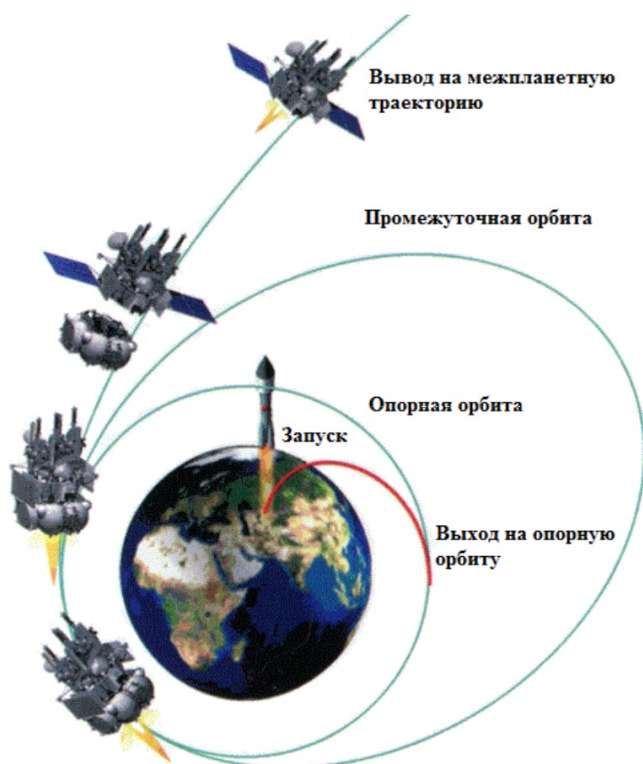


Рис. 1. Схема этапов вывода космического аппарата на траекторию полета к Луне [17]

Земли для полета к Луне с преодолением РПЗ осуществляется в несколько этапов (рис. 1).

Этап 1. Вывод КА на опорную круговую орбиту с высотой до 200 км в пространство под РПЗ. На этой орбите КА защищен магнитным полем Земли от воздействия частиц СКЛ и ГКЛ, по этой причине воздействие радиации от потоков частиц СКЛ, ГКЛ и РПЗ на КА, незначительно и при радиационном расчете баланса лунной миссии, как правило, не учитывается. **Этап 2.** Вывод КА на промежуточную орбиту с параметрами: перигей до 220 км, апогей до 13 000 км и с периодом обращения примерно 4 часа. При движении на промежуточной орбите КА проходит вблизи перигея под радиационными поясами, на уровне экватора Земли пересекает область внутреннего РПЗ, а вблизи апогея пересекает область внешнего РПЗ. **Этап 3.** Вывод КА с промежуточной орбиты на межпланетную траекторию полета к Луне. Суммарное время движения КА на этапах полета 2 и 3, когда он подвержен интенсивному воздействию радиации от частиц высоких энергий СКЛ, ГКЛ и внутреннего и внешнего РПЗ, составляет около 6 ч.

Полет КА через магнитосферу Земли при посадке осуществляется в 2 этапа. **Этап 1.** Выдача тормозного импульса для схода с траектории межпланетного полета. Переход на траекторию снижения. **Этап 2.** Пересечение внешнего и внутреннего РПЗ.

Торможение КА в атмосфере Земли может быть осуществлено одним или двумя «нырками». Суммарное время движения КА на данном этапе полета, когда КА подвержен интенсивному воздействию радиации от заряженных частиц высоких энергий СКЛ, ГКЛ и внешнего и внутреннего РПЗ, составляет около 1 ч.

Результаты и обсуждение

Нормирование радиационного облучения при космических полетах

Характер ионизирующего излучения в космическом пространстве и на лунной поверхности значительно отличается от радиационных параметров, характерных для поверхности Земли. Главную опасность для космонавтов при перелете к Луне и при работе на поверхности Луны представляет ионизирующее излучение солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей [18–21].

Первичные ГКЛ состоят из потоков высокоэнергетических заряженных частиц из недр нашей Вселенной – протонов, альфа-частиц, ядер химических элементов от гелия до ядер более тяжелых элементов до урана с высокими энергиями – от 10^7 – 10^8 эВ (10–100 МэВ) до 10^{20} эВ (10^{10} ГэВ) [15, 18, 22–24]. При оценках радиационной опасности от ГКЛ учитывают высокую проникающую способность этих частиц и эффект их каскадного размножения (вторичного излучения) в материалах.

СКЛ образуются в результате мощных краткосрочных вспышек на поверхности Солнца, вызывающих инжекцию заряженных частиц (протонов, ядер гелия и тяжелых элементов, электронов) в межпланетное пространство. Энергия СКЛ составляет от нескольких кэВ до нескольких ГэВ [19, 25].

Применительно к анализу радиационных воздействий на материалы оболочки космического корабля необходимо учитывать тормозное излучение – потоки протонов, электронов, рентгеновского и гамма-излучения, нейтронов, порожденные взаимодействием первичного ионизирующего излучения ГКЛ и СКЛ с веществом, через которое они проходят [14, 18, 19, 21].

Неблагоприятные эффекты ионизирующего излучения широко известны [1, 2, 26–28] и обосновывают беспороговую концепцию МКРЗ при оценке влияния малых доз на организм человека [29]. В отличие от рентгеновского и гамма-излучения, для высокоэнергетических частиц галактического и солнечного космического излучения характерны эффекты прямого повреждающего действия на ядерные и митохондриальные ДНК с высокой вероятностью двухнитевых разрывов. Ошибки их репарации повышают риск развития канцерогенеза [28], что обуславливает при расчетах эквивалентной дозы увеличение взвешивающего коэффициента излучения (W_R) с 1 до 5.

**Значения дозовых лимитов облучения космонавтов
при космических полетах различной продолжительности [32]**

Критический орган, глубина в ткани	Продолжительность экспозиции	Дозовый лимит, эквивалентная доза, Зв
Все тело	Профессиональный, за карьеру	1,0 (эффективная доза)
Кроветворные органы (красный костный мозг), 5 см	Однократное острое	0,15
	30 дней	0,25
	Один год	0,50
Хрусталик глаза, 0,3 см	30 дней	0,5
	Один год	1,0
	За карьеру	2,0
Кожа, 0,01 см	30 дней	1,5
	Один год	3,0
	За карьеру	6,0

Цель нормирования – ограничить воздействие вредных последствий воздействия радиационного излучения на персонал, находящийся в различных условиях повышенной радиации [30]. Действующие ограничения облучения космонавтов установлены российскими нормативными документами [31, 32], они основаны на накопленных за последний период сведениях о проявлениях острого и хронического облучения человека, а также их последствий. Современная версия российских нормативов [33] отражает существующую в мировой практике тенденцию к увеличению жесткости радиационных лимитов [29] и обеспечивает приемлемые значения вероятностей снижения работоспособности для ситуаций как острых, так и хронических облучений, а также для отдаленных последствий – радиационных рисков от специфических (рак, генетические эффекты) и неспецифических соматических нарушений. Дозовые лимиты облучения космонавтов при полетах различной продолжительности [32] приведены в табл. 1.

Как видно, предел дозы на костный мозг за карьеру космонавтов составляет 1 Зв. Это значение соответствует профессиональному пределу в атомной промышленности. Предел дозы на кроветворные органы для космонавтов при осуществлении околоземного космического полета за год установлен равным 300 мЗв [32, 33]. В новых методических рекомендациях «МР ФМБА 17.01-2021. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2021). М., 2021» по сравнению с прежним нормативом МУ 2.6.1.44-03-2004 для сохранения нормальной работоспособности космонавтов в космическом полете предложено снизить предельный уровень эквивалентной дозы на костный мозг за 30 сут вместо 250 до 150 мЗв и для кратковременного облучения за одно солнечное протонное событие (СПС), развивающееся в

пределах 1 сут, вместо 15 до 10 сЗв [1, 33]. Эти значения относятся к околоземным космическим полетам, но при отсутствии других нормативов до настоящего времени используются и при лунных миссиях, хотя при полетах к Луне воздействующие на космонавтов факторы имеют определенные особенности по сравнению с орбитальными космическими полетами.

Анализ возможных доз облучения космонавтов при полете к Луне

Радиационная опасность, которая создается в РПЗ заряженными частицами, зависит от циклично меняющейся СА и состояния межпланетной среды. Поэтому важно оценить дозы радиации при полете КА через магнитосферу Земли в периоды как низкой, так и высокой интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ. После старта с Земли на этапах полета 2 и 3, находясь на промежуточной орбите, КА пересекает все магнитные оболочки РПЗ, на которых находятся геостационарные спутники. Поэтому имеющиеся данные по потокам релятивистских электронов на геостационарной орбите (рис. 2) можно использовать для прогноза радиационных условий на промежуточной орбите КА, так как эти условия обусловлены изменениями интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ.

Как видно из рис. 2, во внешнем РПЗ зарегистрированы минимумы и максимумы потоков релятивистских электронов продолжительностью от нескольких дней до нескольких десятков дней. Установлено, что во внутреннем РПЗ потоки протонов высоких энергий со временем меняются в небольших пределах, а во внешнем РПЗ потоки релятивистских электронов изменяются в десятки и сотни раз, в зависимости от фазы СА и текущей космической погоды [23, 34, 35]. Поэтому полная

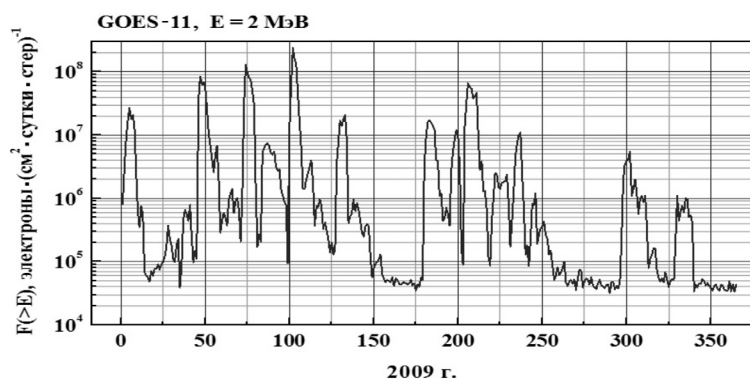


Рис. 2. Изменения со временем интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите за период с 1 января по 31 декабря 2009 г. по данным космического аппарата GOES [23]

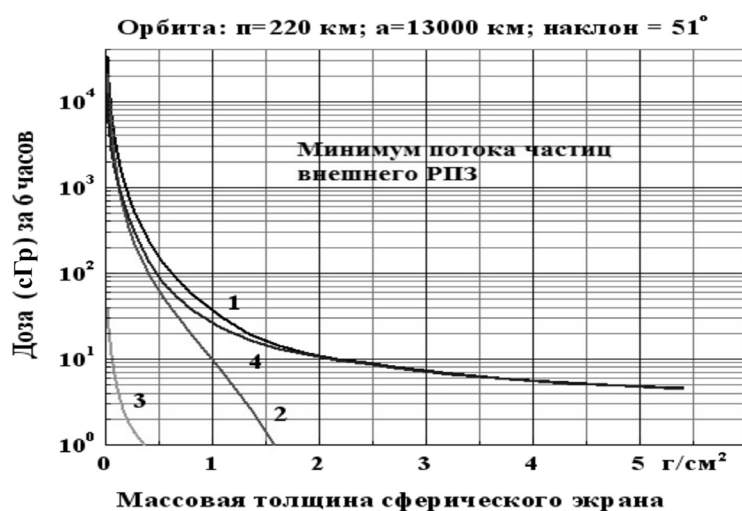


Рис. 3. Поглощенная доза радиации при выводе КА за пределы внутреннего и внешнего РПЗ магнитосферы Земли [23].
Доза радиации: 1 – суммарная от всех частиц РПЗ; 2 – от электронов (в основном) внешнего РПЗ; 3 – от тормозного излучения электронов; 4 – от протонов внутреннего РПЗ

доза радиации на взлете КА складывается из практически постоянной составляющей дозы радиации внутреннего РПЗ и переменной составляющей дозы радиации внешнего РПЗ.

Как показали оценки [23], среднее значение интенсивности потока релятивистских электронов в период минимума СА в 2009 г. на геостационарной орбите составляло около $6,765 \cdot 10^6$ электронов $\cdot (\text{см}^2 \cdot \text{сутки} \cdot \text{стер})^{-1}$. С учетом этого по данным рис. 2 и 3 были рассчитаны коэффициенты кратности максимальных значений ($K_1 = 29$) и минимальных значений ($K_2 = 136$) потока по отношению к среднему значению, которые в последующем были использованы при расчете доз радиации при преодолении РПЗ при минимуме и максимуме СА.

Из данных дозиметрических замеров со спутников, обращающихся на геостационарных орбитах, были использованы расчетные значения (рис. 3, кривая 1 [23]) суммарной поглощенной дозы радиации на промежуточной орбите КА за 6 ч его вывода за пределы магнитосферы Земли на траекторию полета к Луне в условиях среднего потока. Затем с учетом коэффициентов кратности изменения K_1 и K_2 и взвешивающего коэффициента излучения для околоземных орбит $W_R = 3$ [15] были рассчитаны эквивалентные дозы при полетах КА через РПЗ в условиях низкой (САмин), средней (САсп) и высокой (САмакс) СА (табл. 2).

При расчетах доз облучения космонавтов после преодоления РПЗ при движении на межпланетной траектории к Луне использованы реальные значения поглощенной дозы в открытом космосе за полгода прямых измерений потоков ионизирующих излучений (рис. 4, кривая 2) [35]. Как видно, поглощенная доза без защиты за полгода измерений составила 8 сГр. Эквивалентная доза при взвешивающем коэффициенте $W_R = 5$ составит 2,19 мЗв за 1 сут полета и 15,34 мЗв за 7 сут перелета к Луне и обратно без учета дозы облучения при преодолении РПЗ в условиях низкой СА.

На рис. 4 приведены также расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны для второй половины 2018 г. (см. рис. 4, кривая 1), выполненные по модели с 99%-ным доверительным уровнем, который означает, что в 99 из 100 космических миссий уровень поглощенной дозы радиации не превысит расчетных значений. Эта статистическая модель [35] создана на основании большого объема экспериментальных данных многолетних наблюдений за потоками ионизирующих излучения и позволяет оценить предельно высокий уровень поглощенной дозы радиации. Но реальная доза радиации может меняться в крайне широких пределах.

Как видно, реальные данные по дозам радиации на орбите (см. рис. 4, кривая 2) в открытом космосе на несколько порядков меньше расчетных значений по статистической модели (см. рис. 4, кривая 1). Такое большое различие между расчетными значениями дозы радиации и реальными значениями вблизи минимума активности Солнца связано с тем, что во второй половине 2018 г. по модели должны были быть вспышки хотя бы средней мощности, но их не было, а солнечные вспышки, которые произошли за этот период, все были малой мощности, с энергией протонов СКЛ менее 2 МэВ. Солнечные вспышки вносят весомый вклад в дозы радиации, а

Таблица 2

Расчетные значения доз радиации при полетах КА лунной миссии
через магнитосферу Земли при старте и посадке (по данным 2009 г.)

Толщина защиты, г/см ²	Эквивалентная доза (мЗв) при полетах КА через внешний РПЗ при старте (6 ч) и посадке (1 ч) для уровней СА					
	САмин		САсп		САмакс	
	Старт	Посадка	Старт	Посадка	Старт	Посадка
0,0	$6,61 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^7$	$4,35 \cdot 10^6$
1,0	8,83	1,47	1 200	200	34 800	5 800
3,0	1,54	0,26	210	35	6 090	1 015
5,0	1,10	0,18	150	25	4 350	725
10,0	0,66	0,11	90	15	2 610	435
20,0	0,44	0,07	60	10	1 740	290

Таблица 3

Эквивалентные дозы на траектории полета Земля – Луна – Земля в течение 7 сут в командном модуле
в периоды максимума (САмакс) и минимума (САмин) солнечной активности

Защита Al, г/см ²	Эквивалентные дозы излучения (мЗв) за перелет на траектории Земля – Луна – Земля в периоды солнечной активности							
	2018–2019 гг., САмин				2024 г., САмакс		2030 г., САмин	
	По фактическим измерениям		Статистическая модель		Статистическая модель		Статистическая модель	
	1 сут	7 сут	1 сут	7 сут	1 сут	7 сут	1 сут	7 сут
Открытый космос	2,2	15,3	19 780,2	138 461,5	98 630,1	690 410,9	12 328,8	86 301,4
10	1,7	12,1	17,3	121,2	43,2	302,1	9,8	69,0
20	1,6	11,6	5,9	41,5	37,0	258,9	4,2	29,4
30	1,5	10,4	4,0	27,7	22,2	155,3	3,0	20,8
40	0,99	6,9	2,5	17,3	16,0	112,2	1,2	8,6

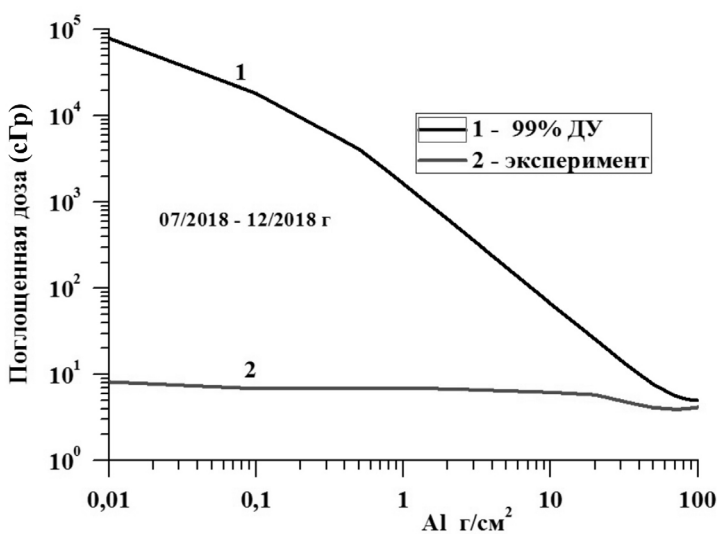


Рис. 4. Результат расчета поглощенной дозы радиации на орбите Луны для второй половины 2018 г. по статистической модели с 99%-ным доверительным уровнем (кривая 1) и реальные значения дозы, наблюдаемые в этот период (кривая 2) [35]

за 11-летний солнечный цикл таких вспышек с разными характеристиками бывает более 10 тысяч [35].

Коэффициенты ослабления дозы излучения для защиты различной массовой толщины получены из расчетных значений поглощенной дозы радиации с доверительным уровнем 99 % от частиц ГКЛ и СКЛ в различные годы 25-го цикла СА [35]: для минимума СА 2019 г. (рис. 5, кривая 1), для максимума СА 2024 г. (см. рис. 5, кривая 4), для минимума СА 2030 г. (рис. 6, кривая 4). Как видно из рисунков и выполненных расчетов (табл. 3), поглощенная доза радиации, рассчитанная для максимума СА, на орбите Луны в несколько раз превосходит дозу радиации, рассчитанную для минимума СА.

В табл. 3 приведены значения эквивалентной дозы излучения, которые могут получить космонавты в командном модуле (КМ) на траектории полета КА Земля – Луна – Земля при различных уровнях защиты из алюминия (Al),

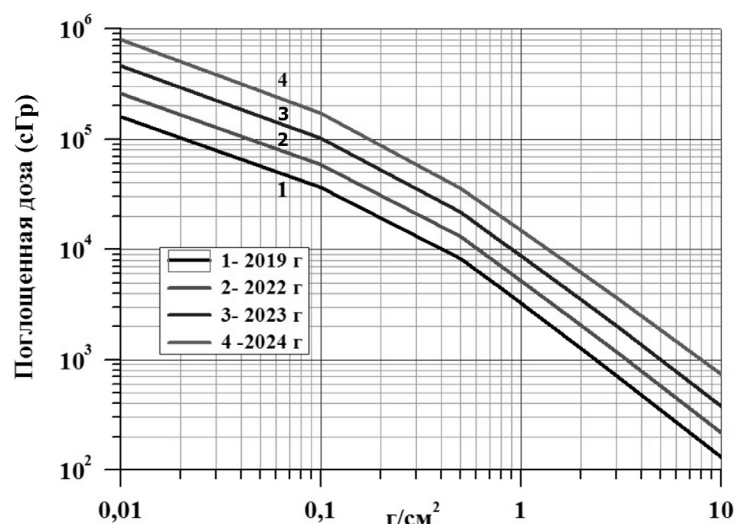


Рис. 5. Расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны по годам фазы роста солнечной активности в 25-м цикле

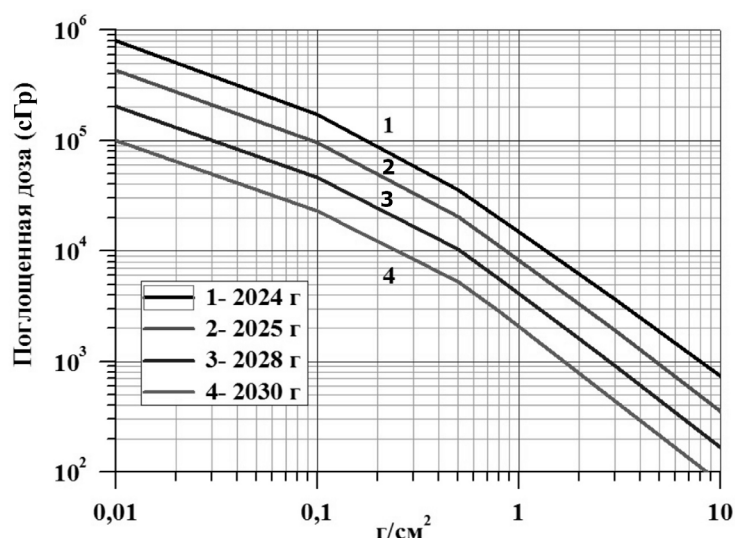


Рис. 6. Расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны по годам фазы спада солнечной активности в 25-м цикле

по фактическим измерениям в годы минимальной СА (2018–2019) и по статистической модели на момент фактических измерений, а также по статистической модели на период максимальной (2024) и минимальной (2030) СА [34–37].

Рассчитанные значения дозы в открытом космосе за 7 суток на трассе Земля – Луна – Земля по фактическим замерам (2018–2019) достигают 15,3 мЗв (без учета доз за время преодоления РПЗ), а значения доз радиации по статистической модели с 99%-ным доверительным уровнем показывают, что доза радиации в этих условиях не превысит уровень 138 461 мЗв.

В целом на этапе 7-суточного перелета Земля – Луна – Земля в 2030 г. по данным статистической модели доза облучения космонавтов может составить при защите КМ в эквиваленте Al 20 г/см² от 70 мЗв (от РПЗ) + 29,4 мЗв (на траектории) при среднем и минимальном уровнях СА до 2030,0 мЗв (от РПЗ) + 258,9 мЗв (на траектории) при максимуме СА при 99%-ном доверительном уровне не превышения этих значений.

Анализ возможных доз облучения космонавтов на поверхности Луны

На поверхности Луны радиационное воздействие обусловлено заряженными частицами различных энергий от ГКЛ, потока солнечных частиц, а также вторичными нейтронами и гамма-лучами (лунное альbedo), возникающими от взаимодействия космического излучения с лунной поверхностью [14, 15]. Для оценки накопленной дозы ионизирующего излучения на борту посадочного модуля миссии «Чанъэ-4» было установлено 10 специальных твердотельных кремниевых детекторов [36]. Разделив поглощенную суммарную дозу излучений на количество дней, в течение которых модуль находился на поверхности Луны, мы получили среднюю дозу за 1 ч и за 1 сут.

По замерам датчика LND на поверхности Луны известна мощность поглощенной дозы от заряженных частиц 10,2 мкГр/ч в кремнии [36]. После пересчета на воду (в сравнимый биологический эквивалент) путем умножения этого значения на коэффициент 1,3 [36] мощность поглощенной дозы в сутки составляет: $10,2 \text{ мкГр/ч} \times 1,3 \times 24 \text{ ч} = 318 \text{ мкГр/сут}$. Мощность эквивалентной дозы от заряженных частиц определена путем умножения на W_R , равный 4,3 [36], и составляет 1367 мкЗв/сут.

По аналогичному алгоритму проведен расчет мощности дозы радиации от нейтральных (незаряженных) компонентов, к которым относили рентгеновское излучение Солнца, нейтроны и гамма-излучение от вторичного лунного альbedo:

$$3,1 \text{ мкГр/ч} \times 1,3 \times 24 \text{ ч} = 97 \text{ мкГр/сут.}$$

При переводе поглощенной дозы от нейтрального компонента излучения в эквивалентную дозу использовано значение $W_R = 2,5$ [15, 34, 38–40]:

$$97 \text{ мкГр/сут} \times 2,5 = 243 \text{ мкЗв/сут.}$$

Суммарная мощность эквивалентной дозы радиации на открытой поверхности Луны от заряженных частиц и незаряженного компонента различных энергий СКЛ, ГКЛ, рентгеновского и гамма излучения составила 1610 мкЗв/сут (1,61 мЗв/сут). Это согласуется с данными NASA [26], по которым при пребывании на Луне дозы радиации у астронавтов были

незначительными и составляли от 1,6 мГр в миссиях «Аполлон-7, -8» до 11,4 мГр в миссии «Аполлон-14», а за всю миссию от 6 до 12,5 сут суммарно до 40 мЗв. По данным дозиметрических измерений китайской автоматической станции «Чанъэ-4» на Луне в 2019 г. значение мощности дозы на поверхности составляло 60 мкЗв/ч [16, 26], тогда как на поверхности Земли мощность дозы в основном не превышает 0,20 мкЗв/ч.

Как показывают вышеприведенные расчеты, при отсутствии вспышек СА средняя суточная доза для человека в этих условиях составит 1,61 мЗв, а за 14 сут пребывания на лунной поверхности без противорадиационной защиты – 22,5 мЗв. При вспышках в этот период расчетные значения доз могут достигать 3–5 Гр за вспышку [15, 35]. Это обуславливает необходимость строительства лунных модулей с достаточной противорадиационной защитой.

Таким образом, по данным дозиметрических измерений на поверхности Луны без применения средств защиты эквивалентные дозы составляли: при минимуме СА 1,61 мЗв/сут, при максимуме СА 10,2 мЗв/сут [41]. Поглощенная доза за солнечную вспышку 11.05.1959 г. в открытом космосе составила около 6 Гр (рис. 7) [35, 42, 43], на поверхности Луны это соответствовало 3 Гр с учетом того, что на поверхности Луны доза в 2 раза меньше, чем в открытом космосе, за счет эффекта экранирования Луной от солнечного космического излучения. При учете взвешивающего коэффициента излучения W_R от 3 до 4 это соответствует эквивалентной дозе от 9 до 12 Зв.

При анализе доз облучения космонавтов на поверхности Луны могут рассматриваться 2 подхода, принимая во внимание различия в уровнях радиации при минимальной и максимальной СА:

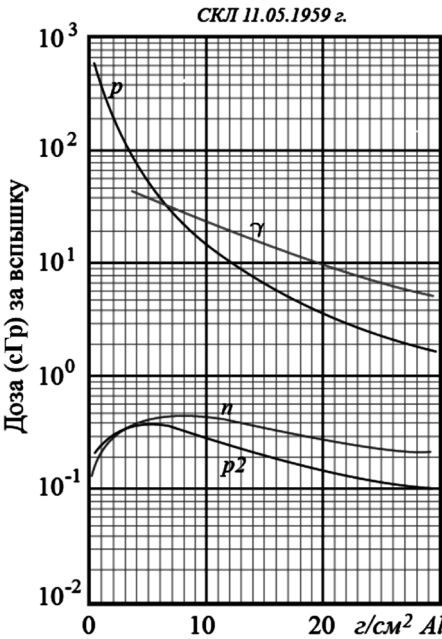


Рис. 7. Зависимость полной поглощенной дозы радиации от первичного излучения (p-протоны) и вторичного (p2-протоны, n-нейтроны, γ- гамма-излучение) за экранами из алюминия [35]. По оси абсцисс – массовая толщина защитного экрана, г/см²; по оси ординат – доза за вспышку (сГр)

- 1) по фактическим измерениям на основании замеров доз излучения датчиков китайского аппарата [36];
 - 2) на основании данных статистического моделирования доз излучения [35].
- Исходя из этого, в табл. 4 приведены фактические и расчетные значения эквивалентной дозы

Таблица 4

Эквивалентная доза облучения космонавта за период пребывания на поверхности Луны за защитой различной толщины посадочного модуля (ПМ), лунного скафандра (ЛС) в различные периоды максимума (САмакс) и минимума (САмин) солнечной активности

Толщина защиты, г/см²/ K ослабления**	Эквивалентные дозы (мЗв) за период 14-суточного пребывания* на поверхности Луны в зависимости от солнечной активности							
	2018–2019 гг., САмин				2024 г., САмакс		2030 г., САмин	
	По фактическим измерениям		Статистическая модель		Статистическая модель		Статистическая модель	
	За сутки	За период	За сутки	За период	За сутки	За период	За сутки	За период
Открытая Луна	1,61	22,5	9 863,01	138 082,2	49 315,1	690 410,9	9 863,0	138 082,2
ПМ 1,5/0,85	1,37	12,8	123,3	1 150,6	616,4	5 753,2	92,5	863,0
ПМ 3,0/0,81	1,31	12,2	43,2	402,7	234,2	2 186,2	26,5	247,4
ПМ 5,0/0,78	1,26	11,8	20,3	189,9	110,9	1 035,6	14,2	132,3
ЛС 0,2/0,9	1,45	6,8	1 232,9	5 753,4	5 547,9	25 886,7	801,4	3 739,2
ЛС 0,5–1,0/0,88	1,42	6,6	203,4	949,2	924,7	4 314,5	123,3	575,3

Примечание. * – за 14 сут нахождения космонавта на поверхности Луны исходили из пребывания в ПМ по 16 ч в день (всего 9 сут 8 ч = 9,33 сут), пребывания в ЛС по 8 ч в сутки (всего 4 сут 16 ч = 4,67 сут); ** – K ослабления рассчитаны по данным кривой 2 на рис. 4 (Безродных И.П., 2021 [35]) в период минимума СА в 2018 г.

в посадочном модуле (ПМ) и в лунном скафандре (ЛС), создаваемой на поверхности Луны, при различных уровнях защиты из Al, в периоды минимума и максимума СА.

Как видно из табл. 4, увеличение массовой толщины защиты на поверхности Луны с 1,5 до 5 г/см² не оказывает существенного влияния на уменьшение дозы облучения космонавта за 14 сут нахождения на поверхности Луны в период минимума СА ввиду сложного спектра компонентов космического излучения и характера его взаимодействия с материалами, эффективность защиты в этих условиях СА повышается только при использовании экранов из Al массовой толщиной 40 г/см² и более (см. рис. 4).

Суммарные дозы облучения космонавтов за лунную миссию

В табл. 5 представлены результаты анализа публикаций по прогнозу доз облучения космонавтов за лунную миссию общей продолжительностью 21 сут с пребыванием на Луне в течение 14 сут по трассе полета в программе «Apollo» 1969 г., названной американцами «Трассой Кондратюка». Использованы измеренные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны в период минимума СА между 24-м и 25-м солнечными циклами за период с июля 2018 г. по декабрь 2018 г. [14, 35], когда фактически не происходили солнечные вспышки, а также значения доз радиации, измеренные датчиками LND китайской посадочной платформой КА «Чанъэ-4», на поверхности Луны в период с 11 января 2019 г. по 3 февраля 2019 г. (минимум СА между 24-м и 25-м солнечными циклами) [16, 36].

Как видно из табл. 5, суммарная доза за лунную миссию в период минимума СА и при отсутствии солнечных вспышек накапливается преимущественно в период преодоления РПЗ (90 мЗв), и всего за миссию общей продолжительностью 21 сут, по данным литературы, она составит 133,5 мЗв. Это позволяет пребывать космонавтам на Луне в капсуле посадочного модуля с защитой в эквиваленте Al массовой толщиной 1,5 г/см² в течение 224 ч (9,3 сут) при общем времени выполнении работ на поверхности Луны в скафандрах типа «Орлан-М» с защитой 0,2 г/см² продолжительностью 112 ч (4,7 сут).

В табл. 6 приведены обобщенные данные выполненных нами выше расчетов по результатам фактических измерений в 2009 и 2018–2019 гг. и статистического моделирования радиационной обстановки для минимума и максимума СА при использовании разных уровней массовой защиты в эквиваленте алюминия. Полученное суммарное значение 136,7 мЗв близко к данным литературы 133,5 мЗв из табл. 5.

Однако, в случае непрогнозируемых мощных солнечных вспышек с дозой облучения в открытом космосе 6 Гр облучение космонавтов неминуемо

приведет к развитию у них острой лучевой болезни тяжелой степени со смертельным исходом [35, 41–43], при этом продолжительность вспышечного потока радиации составляет около 1,5 сут. Об опасности превышения допустимых уровней свидетельствуют и результаты моделирования дозы облучения для условий максимальной СА. Это делает крайне необходимым, особенно при длительных периодах пребывания и выполнения производственных задач в лунных поселениях, использование дополнительных путей защиты от ионизирующих излучений. В качестве одного из таких направлений могут рассматриваться использование реголита и композитных материалов для оборудования лунных модулей.

Существенную неопределенность в величину поглощенной дозы радиации на траектории полета к Луне и в окололунном космическом пространстве вносят потоки частиц СКЛ от солнечных вспышек. В настоящее время уровень развития науки не позволяет прогнозировать с высокой степенью достоверности в конкретные моменты времени и временные интервалы реальные интенсивности потоков частиц СКЛ, их спектры и состав. По этой причине пока не существует возможность определить достаточно точно, какая конкретно доза радиации ожидается на орбите Луны или на ее поверхности в определенный период времени. Реальная доза радиации может в любые моменты времени меняться в широких пределах. На практике мы лишь можем рассчитать уровень поглощенной дозы, который ожидается реальная доза не превысит с определенной вероятностью.

Радиация в околоземном космическом пространстве изучается уже многие десятилетия. В результате этих исследований на базе большого объема экспериментальных данных наблюдений за потоками ионизирующих излучений были построены статистические модели, позволяющие рассчитать предельно высокий уровень поглощенной дозы радиации, который, с определенной вероятностью, в будущем реальная доза радиации не превысит.

На орбите и вблизи поверхности Луны радиационная среда представляет собой сложную смесь потоков ионизирующих частиц, в которых заряженные частицы с высокой проникающей способностью от Солнца и источников вне Солнечной системы представляют реальную опасность для космических лунных миссий. Однако изучение и постоянный мониторинг СА может позволить надежно прогнозировать временные «окна» (продолжительностью до нескольких месяцев) с низким уровнем радиации для перелетов к Луне и обратно.

Вследствие этого в процессе планирования полета к Луне важно учитывать прогноз солнечного цикла. Так, наблюдаемый и прогнозируемый солнечные циклы отражены на графиках веб-сайта Space Weather Prediction Center (SWPC) National Oceanic

Таблица 5

**Предполагаемые дозы радиации по этапам лунной миссии
в период минимума солнечной активности (между 24-м и 25-м солнечными циклами)
при отсутствии солнечных вспышек**

Этапы лунной миссии	Продолжительность, часы (сутки)	Защита на этапе миссии (в эквиваленте алюминия)	Дозы радиации		Источник литературы
			Поглощенная, мГр	Эквивалентная, мЗв	
Выход на орбиту и преодоление РПЗ	6 ч	Командный модуль (10 г/см ²)	30	90	[23, 35]
Полет в межпланетном пространстве Земля – Луна – Земля	168 ч (7 сут)	Командный модуль (10 г/см ²)	2,3	11,5	[34, 35]
Пребывание в капсуле посадочного модуля на Луне	224 ч (9 сут 8 ч)	Посадочный модуль (1,5 г/см ²)	2,5	9,8	[36, 44]
Работа в скафандре «Орлан-М» на поверхности Луны	112 ч (4 сут 16 ч)	Скафандр (0,2 г/см ²)	1,9	7,2	[37]
Обратный полет к Земле через РПЗ	1 ч	Командный модуль (10 г/см ²)	5	15	[45]
Всего за лунную миссию	511 ч (21 сут 7 ч)		41,7	133,5	

Таблица 6

**Дозы облучения космонавтов (мЗв) в краткосрочной лунной миссии
в зависимости от солнечной активности**

Этапы лунной миссии	Факт*	Модель**		Факт*	Модель**	
	САмин	САмин, 2030 г.	САмакс, 2024 г.	САмин	САмин, 2030 г.	САмакс, 2024 г.
Преодоление радиационных поясов Земли	КМ 10 г/см ²			КМ 20 г/см ²		
	105,0	0,8	3 045,0	70,0	0,5	2 030,0
Полет в межпланетном пространстве Земля – Луна – Земля	12,1	69,0	302,1	11,6	29,4	258,9
Луна. Пребывание в капсуле посадочного модуля (9,3 сут)	ПМ 1,5 г/см ²			ПМ 3,0 г/см ²		
	12,8	863,0	5 753,2	12,2	247,4	2 186,2
Луна. Работа в скафандре на открытой поверхности (4,7 сут)	ЛС 0,2 г/см ²			ЛС 1,0 г/см ²		
	6,8	3 739,2	25 886,7	6,6	575,3	4 314,5
Всего за лунную миссию	136,7	4 672,0	34 887,0	100,4	852,6	8 789,6

Примечание. * – по данным дозиметрических измерений в 2009 и 2018–2019 гг. и расчетов защиты на основе этих измерений; ** – указаны максимальные значения модели, которые не будут превышены с вероятностью 99 %; КМ – командный модуль; ПМ – посадочный модуль; ЛС – лунный скафандр.

and Atmospheric Administration (NOAA). Этот прогноз основан на результатах работы международной экспертной группы, созданной в 2019 г. При прогнозе учитываются и отображаются в интерактивном режиме конкретные кривые с учетом ожидаемых неопределенностей во времени начала солнечного цикла и амплитуде показателей. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (рис. 8, 9). В разделе Current Space Weather Conditions on NOAA Scales (Текущие условия космической погоды по шкале NOAA) / Goes Proton Flux (увеличение потока

протонов) <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> прогноз протонных событий выдается для нескольких пороговых значений и для 2 уровней энергии частиц. Значения уровня энергий ≥ 10 МэВ соответствуют пороговым значениям солнечной радиационной бури NOAA (S-scale) 10, 100, 1000, 10 000, 100 000 pfu (proton flux unit – единица потока протонов), основанным на значениях, наблюдаемых или ожидаемых на основном спутнике GOES. Результаты с уровнями энергий ≥ 100 МэВ основаны на едином пороговом значении потока, равном 1 pfu.

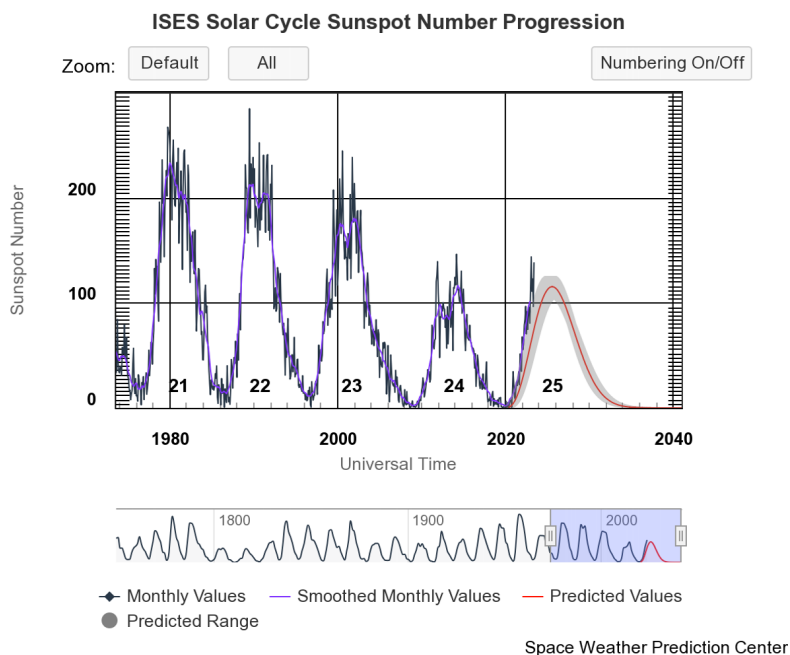


Рис. 8. Прогрессия числа солнечных пятен в солнечном цикле по данным Международной космической экологической службы ISES (the International Space Environmental Services).

По оси ординат – Sunspot Number – число (количество) солнечных пятен

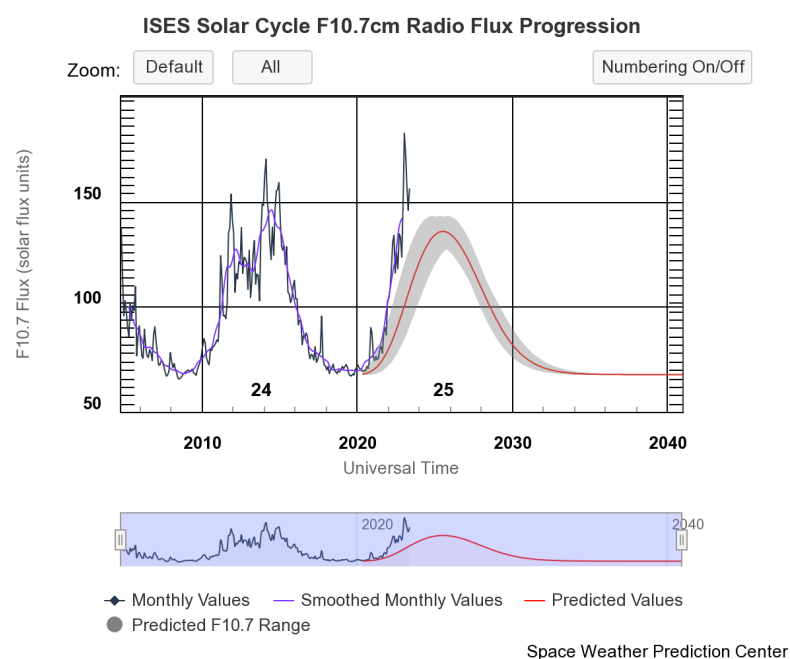


Рис. 9. Прогрессия радиопотока F10.7cm в солнечном цикле по данным Международной космической экологической службы ISES (the International Space Environmental Services).

По оси ординат – F 10,7 Flux (solar flux units) – радиопоток F 10,7 sfu (sfu - единица измерения солнечного потока)

Предупреждения о протонных событиях – это прогнозы протонного события, которые выдаются SWPC при 2 условиях: предупреждение об ожидаемом наступлении протонного события и предупреждение об ожидаемом сохранении протонного события, которое уже происходит. Предупреждение об интегральном потоке энергии ≥ 10 МэВ выдается на основе ожидаемого достижения или превышения уровней потока в 10 rfu. Предупреждение об интегральном потоке энергии ≥ 100 МэВ выдается на основе ожидаемого достижения или превышения уровней потока в 1 rfu.

Обзор космической погоды на недельные периоды публикуется на сайте Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»): <http://ipg.geospace.ru/space-weather-forecast.html>. Прогноз содержит данные по вспыхивной и интегральной (число Вольфа) СА, состоянию геомагнитного поля, потоках протонов, радиационной обстановке в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых КА.

Прогнозы солнечного цикла используются различными агентствами и отраслевыми группами. Так, солнечный цикл важен для определения срока службы спутников на низкой околоземной орбите – более высокий солнечный максимум сокращает, а более низкий – продлевает срок службы спутника. Кроме того, прогноз дает приблизительное представление о частоте штормов космической погоды всех типов – от отключения радиосвязи до геомагнитных бурь и радиационных всплесков, поэтому его использование важно как для различных отраслей промышленности, так и для оценки ожидаемого воздействия космической погоды на дозы облучения космонавтов при перелете к Луне в ближайшие годы.

Можно заключить, что дозы облучения космонавтов во многом определяются уровнем СА на момент совершения миссии, которая имеет волнообразный характер в виде 11-летних циклов от минимума к максимуму СА. Как показывают измерения, в 2022–2024 гг. наблюдается максимум СА, который снизится к 2030 году. Это необходимо учитывать при прогнозировании возможных доз облучения космонавтов и планировании космического полета к Луне.

Выводы

1. При прогнозировании уровней радиационной опасности для космонавтов при краткосрочной лунной миссии необходимо учитывать разные критерии оценки уровней воздействия ионизирующего излучения на этапе взлета и посадки при прохождении РПЗ, доз облучения космонавтов от СКЛ и ГКЛ на траектории полета к Луне и обратно, а также радиационного воздействия на космонавтов на поверхности Луны с учетом минимальной и максимальной СА.

2. Дозы облучения космонавтов за 21-суточную лунную миссию с пребыванием на поверхности Луны в течение 14 сут при минимальной СА составят около 130 мЗв, однако при максимальной СА и в случае солнечной вспышки дозы облучения по данным измерений могут достигать 9–12 Зв при максимально допустимых 250 мЗв за 1 мес.

3. С целью минимизации доз радиации, которые получают космонавты от заряженных частиц внутреннего и внешнего РПЗ, необходимо учитывать прогноз СА для оптимизации времени старта космического аппарата в «окна», когда для внешнего РПЗ характерны минимальные потоки релятивистских электронов, а также с учетом состояния космической погоды на трассе полета к Луне.

4. Увеличение массовой толщины противорадиационной защиты командного модуля в эквиваленте алюминия с 10 до 20 г/см² и лунного скафандра в эквиваленте алюминия с 0,2 до 0,5–1 г/см² позволит в 1,4 раза снизить общую дозу облучения космонавтов за краткосрочную лунную миссию в период минимальной солнечной активности.

Список литературы

1. Григорьев Ю.Г., Ушаков И.Б., Шафиркин А.В. Особенности радиационного нормирования в СССР (России) и США применительно к длительным пилотируемым космическим полетам // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 9. С. 861–867. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-861-867>.

Grigoryev Yu.G., Ushakov I.B., Shafirkin A.V. Peculiarities of radiation normalization in the USSR (Russia) and the USA concerning to long-term pilotable space flights // Gigiena i sanitaria. 2017. V. 96. № 9. P. 861–867.

2. Самойлов А.С., Ушаков И.Б., Шуршаков В.А. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полетах: мониторинг и защита // Экология человека. 2019. № 1. С. 4–9.

Samoylov A.S., Ushakov I.B., Shurshakov V.A. Radiation exposure during the orbital and interplanetary spaceflights: monitoring and protection // Ekologiya cheloveka. 2019. № 1. P. 4–9.

3. Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Оценки индивидуальных доз космонавтов по показаниям бортовых дозиметров

// Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 2. С. 29–33. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-29-33.

Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Effective doses from ionizing radiation exposure of cosmonauts during extravehicular activity // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 2. P. 29–33. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-29-33.

4. Шафиркин А.В., Бенгин В.В., Бондаренко В.А. и др. Дозовые нагрузки и суммарный радиационный риск для космонавтов при длительных полетах на ОС «Мир» и Международной космической станции // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 1. С. 12–23. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-1-12-23.

Shafirkin A.V., Benguin V.V., Bondarenko V.A. et al. Dose loads and total radiation risk for cosmonauts in long-term missions to the orbital station mir and international space station // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 1. P. 12–23. DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-1-12-23.

5. Бондаренко В.А., Митрикас В.Г., Цетлин В.В. Характеристики радиационных условий среды обитания на МКС в период 24-го цикла солнечной активности // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53. № 5. С. 17–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-5-17-21.

Bondarenko V.A., Mitrikas V.G., Tsetlin V.V. Characteristics of the ISS radiation environment in the period of the 24th solar cycle // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2019. V. 53. № 5. P. 17–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-5-17-21.

6. Митрикас В.Г. Отдельные аспекты радиационного воздействия на космонавтов при пересечении магнитосферы Земли // Авиакосм. и экол. мед. 2021. Т. 55. № 3. С. 51–56. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-3-51-56.

Mitrikas V.G. Some aspects of the radiation exposure of cosmonauts traversing the earth's magnetosphere // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2021. V. 55. № 3. P. 51–56. DOI: 10.21687/0233-528X-2021-55-3-51-56.

7. Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Эффективные дозы облучения ионизирующей радиацией космонавтов при выполнении внекорабельной деятельности // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 3. С. 23–29.

Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Effective doses from ionizing radiation exposure of cosmonauts during extravehicular activity // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2016. V. 50. № 3. P. 23–29.

8. Митрикас В.Г. Оценка эффективных доз ионизирующей радиации экипажей Международной космической станции методом расчетного моделирования // Авиакосм. и экол. мед. 2015. Т. 49. № 3. С. 5–11.

Mitrikas V.G. Estimation of ionizing radiation effective doses to crews of the International space station by the method of calculation modeling // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2015. V. 49. № 3. P. 5–11.

9. Митрикас В.Г. Динамическая модель радиационной обстановки для оперативного обеспечения радиационной безопасности космонавтов в космическом полете: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2000.

Mitrikas V.G. A dynamic model of the radiation situation for operational provision of radiation safety of astronauts in space flight: Avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk. Moscow, 2000.

10. Бондаренко В.А. Оценка радиационных нагрузок на космонавтов МКС с использованием геометрической модели тела человека: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007.

Bondarenko V.A. Assessment of radiation loads on the ISS astronauts using a geometric model of the human body: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata tekhnicheskikh nauk. Moscow, 2007.

11. ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. М., 1986.

STATE STANDARD 15484-81 Ionizing radiations and their measurements. Terms and definitions. Moscow, 1986.

12. International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1991), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. V. 21 (1-3). P. 1-201.

13. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)». Москва, 2010.

SP 2.6.1.2612-10 «Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB-99/2010)». Moscow, 2010.

14. Spence H.E., Golightly M.J., Joyce C.J. et al. Relative contributions of galactic cosmic rays and lunar proton «albedo» to dose and dose rates near the Moon // Space Weather. 2013. V.11. P. 643-650. DOI: 10.1002/2013SW000995. URL: <http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf>.

15. Новиков Л.С. Космическое материаловедение. М., 2014.

Novikov L.S. Space materials science. Moscow, 2014.

16. Zhang S., Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J. et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface // Sci. Adv. 2020. V. 6. № 39. eaaz1334. DOI: 10.1126/sciadv.aaz1334.

17. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Г.М. Полищук, К.М. Пичхадзе, ред. М., 2010.

Automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research / G.M. Polishchuk, K.M. Pichkhadze, eds. Moscow, 2010.

18. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. Галактические космические лучи // Модель космоса. 8-е изд., Т. 1. / М.И. Панасюк, ред. М., 2007. С. 62-95.

Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Roganova T.M. Galactic cosmic rays // A model of the cosmos. 8th ed., V. 1. / M.I. Panasyuk, ed. Moscow, 2007. P. 62-95.

19. Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи // Модель космоса. 8-е изд., Т. 1. / М.И. Панасюк, ред. М., 2007. С. 294-313.

Belov A.V., Kurt V.G. Solar cosmic rays // A model of the cosmos. 8th ed., V. 1. / M.I. Panasyuk, ed. Moscow, 2007. P. 294-313.

20. Ionizing radiation in Earth's atmosphere and in space near Earth // Wallace Friedberg Kyle Copeland Civil Aerospace

Medical Institute Federal Aviation Administration. Oklahoma City, OK 73125. P. 1-32.

21. Денисов А.Н., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А. и др. К проблеме радиационной обстановки на Луне // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 6. С. 524-531.

Denisov A.N., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A. et al. On the problem of the radiation situation on the Moon // Kosmicheskie issledovaniya. 2010. V. 48. № 6. P. 524-531.

22. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Семёнов В.Т. Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений // Вопросы электромеханики. 2012. Т. 131. № 6. С. 15-18.

Bezrodnykh I.P., Morozova E.I., Petrukovich A.A., Semenov V.T. Evaluation of optimal parameters of screens for protecting electronic systems of spacecraft from ionizing radiation // Voprosy elektromekhaniki. 2012. V. 131. № 6. P. 15-18.

23. Безродных И.П. Факторы космического пространства, влияющие на исследование и освоение Луны. М., 2014. URL: <https://studylib.ru/doc/2735279/bezrodnyh-i.p.-iki-ran-spisok-normativnyh>.

Bezrodnykh I.P. Factors of outer space affecting the exploration and exploration of the Moon. Moscow, 2014. URL: <https://studylib.ru/doc/2735279/bezrodnyh-i.p.-iki-ran-spisok-normativnyh>.

24. ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. М., 1991.

GOST 25645.150-90. Cosmic galactic rays. A model for changing particle flows. Moscow, 1991.

25. ГОСТ 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. Госстандарт России. М., 2001.

GOST 25645.165-2001. Cosmic solar rays. Probabilistic model of proton fluxes. Gosstandart of Russia. Moscow, 2001.

26. Орлов О.И., Панасюк М.И., Шуршаков В.А. Радиационный фактор при лунных миссиях // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53. № 4. С. 5-18. DOI: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2019-53-4-5-18>.

Orlov O.I., Panasiuk M.I., Shurshakov V.A. Radiation factor in lunar missions // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2019. V. 53. № 4. P. 5-18.

27. Ушаков И.Б. Космос. Радиация. Человек (радиационный барьер в межпланетных полетах). М., 2021.

Ushakov I.B. Space. Radiation. Human (radiation barrier in interplanetary flights). Moscow, 2021.

28. Barcellos-Hoff M.H., Blakely E.A., Burma S. et al. Concepts and challenges in cancer risk prediction for the space radiation environment // Life Sci. Space Res. (Amst). 2015. V. 6. P. 92-103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.07.006>.

29. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ): Пер с англ. М., 2009.

Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Moscow, 2009.

30. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / СП 2.6.1.758-99. М., 2009.

Limits of radiation safety (NRS-99/2009) SP. 2.6.1.758-99. Moscow, 2009.

31. ГОСТ 25645.215-85 БРЭКАКП. Нормы безопасности при продолжительности полетов до 3 лет. М., 1986.

GOST 25645.215-85 BREKAKP. Safety regulations for the duration of flights up to 3 years. Moscow, 1986.

32. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.6.1.44-03-2004. Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2004). М., 2004.

Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.44-03-2004. Limits of cosmonauts' irradiation for orbital near-earth space flights. Workbook MU 2.6.1.44-03-2004. Moscow, 2004.

33. Ушаков И.Б., Григорьев Ю.Г., Шафиркин А.В., Шуршаков В.А. Обоснование пределов доз к новому нормативному документу по радиационной безопасности длительных космических полетов на орбитах высотой до 500 км // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 1. С. 39–54.

Ushakov I.B., Grigoriev Yu.G., Shafirkin A.V., Shurshakov V.A. Substantiation of dose limits for a new normative document on radiation safety of long-duration space missions at orbit altitudes of up to 500 km // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2016. V. 50. № 1. P. 39–54.

34. Петров В.М., Митрикас В.Г., Тельцов М.В. и др. Радиационная дозиметрия в космическом полете // Модель космоса. 8-е изд., Т. 1. / М.И. Панасюк, ред. М., 2007. С. 642–667.

Petrov V.M., Mitrikas V.G., Teltsov M.V. et al. Radiation dosimetry in space flight // A model of the cosmos. 8th ed., V. 1. / M.I. Panasyuk, ed. Moscow, 2007. P. 642–667.

35. Безродных И.П. Космическая радиация – основная угроза при космических полетах. М., 2021. 38 с. URL: <https://studylib.ru/doc/6428972/bezrodnyh-i.p.-kosmicheskaya-radiaciya---osnovnaya-ugroza-pri>.

Bezrodnykh I.P. Space radiation is the main threat during space flights. Moscow, 2021. URL: <https://studylib.ru/doc/6428972/bezrodnyh-i.p.-kosmicheskaya-radiaciya---osnovnaya-ugroza-pri>.

36. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I. et al. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4 // Space Sci. 2020. Rev. 216 (104). URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00725-3>.

37. Радиационные требования и параметры лунного скафандра // Человек на Луне. Дозы радиации при полете на Луну. URL: <https://oko-planet.su/science/sciencecosmos/page,5,225516-chelovek-na-lune-dozy-radiacii-pri-polete-na-lunu.html>.

Radiation requirements and parameters of the lunar spacesuit // Man on the Moon. Radiation doses during a flight to the Moon. URL: <https://oko-planet.su/science/sciencecosmos/page,5,225516-chelovek-na-lune-dozy-radiacii-pri-polete-na-lunu.html>.

38. Schwadron N.A., Baker T., Blake B. et al. Lunar radiation environment and space weathering from the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER) // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. E00H13.

39. Schwadron N.A., Rahmanifard F., Wilson J. et al. Update on the worsening particle radiation environment observed by CRaTER and implications for future human deep-space exploration // Space Weather. 2018. V. 16. P. 289–303.

40. The effect of the varying distance on the effective shielding by the Moon is included in the dose rates published by the CRaTER team, as discussed on their website // Cosmic ray telescope for the effects of radiation (CRaTER). URL: (<http://prediccs.sr.unh.edu/craterweb/algorithms.html>).

41. Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И. и др. Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне // Косм. исследования. 2012. Т. 50. № 3. С. 224–228.

Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Panasyuk M.I. et al. Assessment of radiation risk for astronauts on the Moon // Kosmicheskie issledovaniya. 2012. V. 50. № 3. P. 224–228.

42. Курт В.Г. Солнечные вспышки // Модель космоса. 8-е изд., Т. 1. / М.И. Панасюк, ред. М., 2007. С. 272–293.

Kurt V.G. Solar flares // A model of the cosmos. 8th ed., V. 1. / M.I. Panasyuk, ed. Moscow, 2007. P.272-293.

43. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I. et al. Planetary Science. First measurements of the radiation dose on the lunar surface // Sci. Adv. 2020. V. 6. eaaz1334.

44. «Аполлон» (космическая программа) // Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон_\(космическая_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон_(космическая_программа)).

Apollo (space program) // Material from Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон_\(космическая_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон_(космическая_программа)).

45. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. Радиационные эффекты в космосе. Ч. 1. Радиация в околоземном космическом пространстве. М., 2014.

Bezrodnykh I.P., Tyutnev A.P., Semenov V.T. Radiation effects in space. Pt. 1. Radiation in near-earth space. Moscow, 2014.

Поступила 03.07.2023

ANALYSIS OF PROBABLE RADIATION LEVELS TO COSMONAUTS IN A SHORT-TERM LUNAR MISSION

Ivanov I.V.^{1, 2}, Burmistrov V.I.², Matkevich E.I.³

¹State scientific-research Institute of military medicine of Defense Ministry of the Russian Federation, St. Petersburg

²Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)

³Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow

Probable dose loads to cosmonauts in a short-term lunar mission including the transit and stay on the surface were estimated using actual measurements and model calculations.

It was found that doses of radiation received in a 21-day mission with a 14-day stay on the Moon in the period of

minimal solar activity will make about 130 mSv; in the period of solar maximum and in case of a solar event radiation doses may reach 9–12 Sv with the maximum admissible dose of 250 mSv over a month. Increase of mass thickness of radiation shield of the command module from 10 to 20 g/cm² (aluminum equivalent) and of the EVA spacesuit from 0.2 to 0.5-1.0 g/cm² (aluminum equivalent) can reduce 1.4 times the total dose to cosmonauts in the period of solar minimum.

Minimization of crew radiation levels requires a consideration of the solar activity forecast in order to choose

the launch «windows» when high-energy electrons flow in the Earth's external radiation belt is minimal, and space weather along the route to the Moon.

Key words: space mission, cosmonauts, Moon, short-term lunar mission, solar activity, radiation dose, radiation protection.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 32–46.

УДК 612.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ФЛОУМЕТРОВ

Дунаев А.В.¹, Локтионова Ю.И.¹, Жарких Е.В.¹, Федорович А.А.^{2,3}, Сидоров В.В.⁴,
Васин А.В.⁵, Дубинин В.И.⁵

¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева

²Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва

³Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

⁴ООО НПП «ЛАЗМА», Москва

⁵Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская область

E-mail: dunaev@bmecenter.ru

В работе впервые представлены результаты исследования микроциркуляции крови в условиях невесомости, полученные с помощью портативных лазерных анализаторов «ЛАЗМА ПФ». С привлечением членов экипажа – участников исследований (космонавт № 1 и космонавт № 2) выполнены наземные и бортовые (9 сут) сеансы измерений в течение 8 мин с использованием 2 носимых флоуметров, закрепленных симметрично на коже височных областей головы, ладонных поверхностей дистальных фаланг III пальцев рук, наружных поверхностей предплечий и подошвенных поверхностей дистальных фаланг I пальцев стоп.

Выявлено снижение средней величины перфузии (более чем в 2 раза) в пальцах ног у космонавта № 1 из-за перераспределения крови в верхнюю часть тела в первые 2–3 сут полета с дальнейшей адаптацией в виде повышения перфузии до средних значений наземных условий. У космонавта № 2 в результате применения профилактического средства, создающего компрессию в проксимальных областях нижних конечностей с целью искусственного депонирования в них крови, были отмечены высокоамплитудные колебания частотой около 1/мин (НО-зависимые). У космонавта № 1 в первые 2–3 сут полета на фоне естественной адаптации отмечались высокоамплитудные эндотелиальные вазомоции частотой 1 колебание в 3–4 мин, что предположительно связано с действием эндотелиального гиперполяризующего фактора. В целом в процессе перестройки системы микроциркуляции крови в условиях микрогравитации наиболее выраженные изменения параметров происходили в височной области головы и в области нижних конечностей на 2-е и 3-и сутки полета и характеризовались значимым снижением тканевой перфузии, повышением сосудистого тонуса с постепенным восстановлением предполетных значений к 6-м суткам космического полета (КП).

Впервые предложена методика исследования в условиях КП и получены данные о состоянии микроциркуляции крови космонавтов в период острой адаптации к

условиям микрогравитации и реадaptации после завершения КП.

Ключевые слова: космический полет, микроциркуляция крови, тканевая перфузия, лазерная доплеровская флоуметрия, портативные приборы, невесомость, микрогравитация.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 47–54.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-47-54

С самого начала освоения человеком космоса существенное значение придается изучению влияния невесомости (микрогравитации) на сердечно-сосудистую систему [1–4]. Известно много работ, основанных как на математическом [5, 6], так и на экспериментальном моделировании эффектов невесомости в наземных условиях с помощью «сухой» иммерсии [7] или антиортостатической гипокинезии (АНОГ) [8, 9]. Стоит отметить, что в последнее время наблюдается все больший интерес к изучению микроциркуляторных процессов при влиянии факторов космического полета (КП) с оценкой состояния периферической гемодинамики верхних и нижних конечностей человека с помощью «сухой» иммерсии, но с длительностью экспериментов не более 5 сут [10]. Особый интерес представляет исследование системы микроциркуляции крови (МЦК) нижних конечностей и головы, поскольку при микрогравитации имеет место перераспределение крови в краниальном направлении [2]. Данная гемодинамическая ситуация в наземных условиях моделировалась с применением методики АНОГ при наклоне головы на уровне -6° [11]. В случае моделирования эффектов невесомости при параболических полетах авторами оценивался хориоидальный кровоток [11].

Ранее коллективу авторов [12, 13] впервые удалось провести регистрацию параметров МЦК в

условиях КП с помощью широко распространенного в клинично-лабораторных исследованиях метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) [14] и выявить нарушение функции эндотелия на фоне снижения базального уровня тканевой перфузии в одной локальной области. Авторы не оценивали изменения МЦК в других областях для выявления системных изменений микрогемодинамики в условиях КП. Кроме того, указанное пилотное исследование было проведено только на коже предплечья с оценкой изменений лишь среднего уровня тканевой перфузии без анализа механизмов регуляции микрокровотока. В то же время проведенные на Земле исследования демонстрируют, что результаты наземных экспериментов с моделированием условий невесомости не всегда в полной мере отражают изменения, происходящие в сердечно-сосудистой системе человека в реальных условиях невесомости на Международной космической станции (МКС) [15].

В последнее время благодаря созданию миниатюрных источников лазерного излучения (прежде всего VCSEL-лазеров) сделан значительный прорыв в исследованиях состояния системы МЦК – разработаны портативные анализаторы МЦК «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия), реализующие метод ЛДФ и контроль температуры области исследований, работающие без оптоволоконного зонда и передающие данные измерений на персональный компьютер по радиочастотным каналам связи (Bluetooth, Wi-Fi). Данные портативные флоуметры постепенно находят все большее применение в медицинской практике при диагностике расстройств МЦК, связанных с сахарным диабетом, гипертонией и сосудистыми осложнениями коронавируса, а также прошли апробацию при оценке статуса курения и в оценке качества выполнения дыхательных упражнений [16].

Цель данной работы – оценка изменений микрогемодинамики в коже головы, верхних и нижних конечностях методом ЛДФ в условиях реального КП с помощью портативных анализаторов МЦК.

Методика

Портативный анализатор МЦК «ЛАЗМА ПФ» выполнен в виде компактного носимого устройства, которое может быть удобно размещено для проведения измерений на любом участке тела, включая голову, верхние и нижние конечности. В представленной работе анализируются результаты только ЛДФ-канала прибора, у которого имеется также канал флуоресцентной спектроскопии (ФС) для оценки окислительного метаболизма в области исследований. Внешний вид передней и задней панелей анализатора представлен на рис. 1.

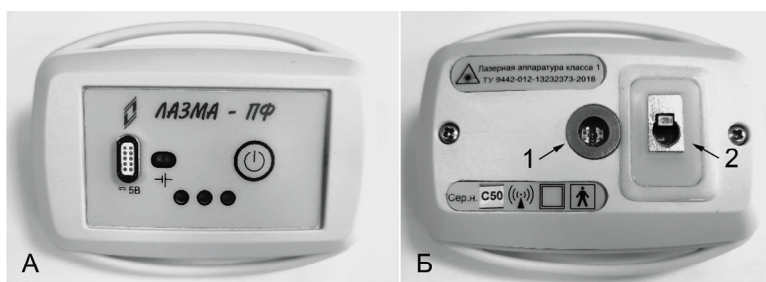


Рис. 1. Внешний вид носимого анализатора.

А – передняя часть; Б – контактная часть (1 – окно ЛДФ-канала; 2 – окно ФС-канала)

ЛДФ-канал с длиной волны зондирования 850 нм (мощность излучения – не более 0,8 мВт) регистрирует тканевую перфузию примерно в 1,5–2,0 мм³ кожи, регистрируемый параметр – показатель микроциркуляции (ПМ) крови, определяемый в условных перфузионных единицах (пф. ед.). Программное обеспечение позволяет анализировать 5 типов осцилляций микрокровотока в широком диапазоне частот (0,0095–2 Гц), параметры которых рассчитываются с помощью математического аппарата вейвлет-преобразования. Колебания тканевой перфузии обусловлены результатом одновременной работы различных регуляторных механизмов: эндотелиального (Э) 0,0095–0,02 Гц, нейрогенного (Н) 0,02–0,06 Гц и миогенного (М) 0,06–0,16 Гц, дыхательного (Д) 0,16–0,4 Гц и сердечного (С) 0,4–1,6 Гц [14, 17, 18].

В работе описываются результаты, полученные при проведении космического эксперимента (КЭ) SFP-MCS «ЛАЗМА» по исследованию МЦК и флуоресценции биотканей в условиях невесомости (микрогравитации) на борту МКС (модуль «Наука» российского сегмента (РС) МКС) во время ее посещения (ЭП-20, 8–20 декабря 2021 г.). 2 космическими туристами (без опыта КП) и бортинженером (профессиональным космонавтом) [16]. Все испытуемые подписали Информированное согласие на участие в эксперименте, согласно протоколу о намерении совместного участия в исследованиях ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» от 10.11.2021 г. Выполнены наземные (9 – до, 5 – после КП) и бортовые (9) ежедневные сеансы регистрации параметра МЦК в течение 8 мин с использованием носимого анализатора «ЛАЗМА ПФ» космонавтом и одним из космических туристов. Регистрация параметров МЦК осуществлялась 2 флоуметрами симметрично в 4 зонах: височная область головы, наружная поверхность предплечий на 2 см выше шиловидных отростков локтевых костей, ладонная поверхность дистальных фаланг III пальцев кистей и подошвенная поверхность дистальных фаланг I пальцев стоп. Стоит отметить, что за сутки до старта

и в день приземления, а также в первые и последние сутки КП измерения не проводились. Во время КП обеспечивалась ежедневная отправка зарегистрированных данных на Землю для их анализа, что позволяло оценивать процессы перестройки и адаптации системы МЦК в условиях реального КП у космонавтов.

В качестве исходных (предполетных) значений использовались результаты измерений, проведенных на Земле во время подготовки экипажа к КП на космодроме Байконур. Реадаптация организма к условиям гравитации Земли оценивалась во время нахождения экипажа в ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» после приземления, начиная со 2-х суток. Во время наземных этапов исследования проводились в положении лежа на кушетке при комнатной температуре (23–24 °С), во время КП (модуль «Наука» РС МКС) – в свободном положении тела при температуре 21–23 °С (при относительной влажности 40–50 % и атмосферном давлении 743 мм рт. ст.), на всех этапах измерения осуществлялись примерно в одно и то же время суток (как минимум через 2 ч после приема пищи и с 15-минутным периодом адаптации). К ограничениям КЭ можно отнести несколько неполных или некорректно (с «промахами») зарегистрированных данных в нескольких областях у обоих космонавтов как на предполетном этапе, так и после КП (послеполетные измерения на космонавте № 2 проводились в течение 2 сут). В статье приводится анализ данных по левой стороне тела, так как они были получены в полном объеме.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведена динамика среднего уровня тканевой перфузии во всех исследуемых областях на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА» (точками обозначены усредненные значения тканевой перфузии за 8 мин с отложенными среднеквадратическими отклонениями).

Из представленных на рис. 2 данных видно, что в процессе адаптации системы МЦК к условиям микрогравитации наиболее выраженные изменения тканевой перфузии отмечаются в первые 3–4 сут КП для висков (космонавты № 1 и № 2) и пальцев ног (космонавт № 1), заключающиеся в первоначальном снижении среднего уровня ПМ с последующим возвращением до уровня предполетных значений на 6–7-е сутки КП.

Стоит отметить, что наблюдаемый большой разброс (около 30–40 % во всех участках) средней перфузии на предполетном этапе связан с интенсивными подготовительными работами космонавтов (вестибулярные тренировки, тренировки на ортостоле и др.), причем зачастую, ввиду плотного графика космонавтов, тренировки осуществлялись

за 1–2 ч до проведения регистрации перфузии. Однако даже данное ограничение в исследовании позволяет увидеть основные тенденции изменений средней перфузии во всех 4 участках организма человека, а именно ее уменьшение (например, более чем в 2 раза в I пальце стопы) на 2–3-и сутки КП с последующим ее резким увеличением к 5–6-м суткам КП (процесс адаптации к условиям невесомости при КП). В меньшей степени данные изменения проявляются в области кожи предплечья, что может быть связано как с расположением данной области в центральной плоскости тела, так и с активным использованием рук космонавтами в процессе КП. Кроме того, данная область подвергается меньшим гемодинамическим перестройкам, чем микроциркуляторное русло стоп или висков, и отличается ангиоархитектоникой микроциркуляторного русла, характеризующейся гемодинамически незначительным количеством артериоло-венулярных анастомозов и преимущественно нутритивной функцией микрокровотока.

Анализ изменений показателя МЦК и амплитуд колебаний кровотока, характеризующих механизмы регуляции, проведен во время КП для височной области головы и подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы космонавта № 1 для 1-х суток дополетных исследований (гравитационное поле Земли), 2-х и 6-х суток КП (рис. 3).

Из представленных на рис. 3, А данных видно, что в «острую» фазу функциональной перестройки системы МЦК (2-е сутки КП) уровень тканевой перфузии в области подошвенной поверхности стоп снижается почти в 2 раза относительно усредненных наземных значений (пример зарегистрированного показателя МЦК в наземных условиях взят для 1-х суток предполетных измерений ввиду последующего повышения интенсивности тренировок перед полетом), что, вероятнее всего, обусловлено перемещением крови от нижних конечностей в краниальном направлении.

На 6-е сутки КП уровень тканевой перфузии увеличивается почти в 5 раз относительно 2-х суток КП и превышает значения в условиях гравитационного поля Земли почти в 2 раза, что можно считать проявлением процесса адаптации системы МЦК к условиям невесомости.

Представляет интерес изменение активности механизмов регуляции тканевой перфузии при наземных измерениях и во время КП. По результатам амплитудно-частотного вейвлет-анализа колебаний кровотока в нижних конечностях (см. рис. 3, В) можно сделать заключение, что при изменении гравитации амплитуды тонус-формирующих механизмов модуляции микрокровотока (эндотелиальный, нейрогенный, миогенный) снижаются, что можно расценивать как повышение тонуса сосудов вследствие действия данных регуляторных

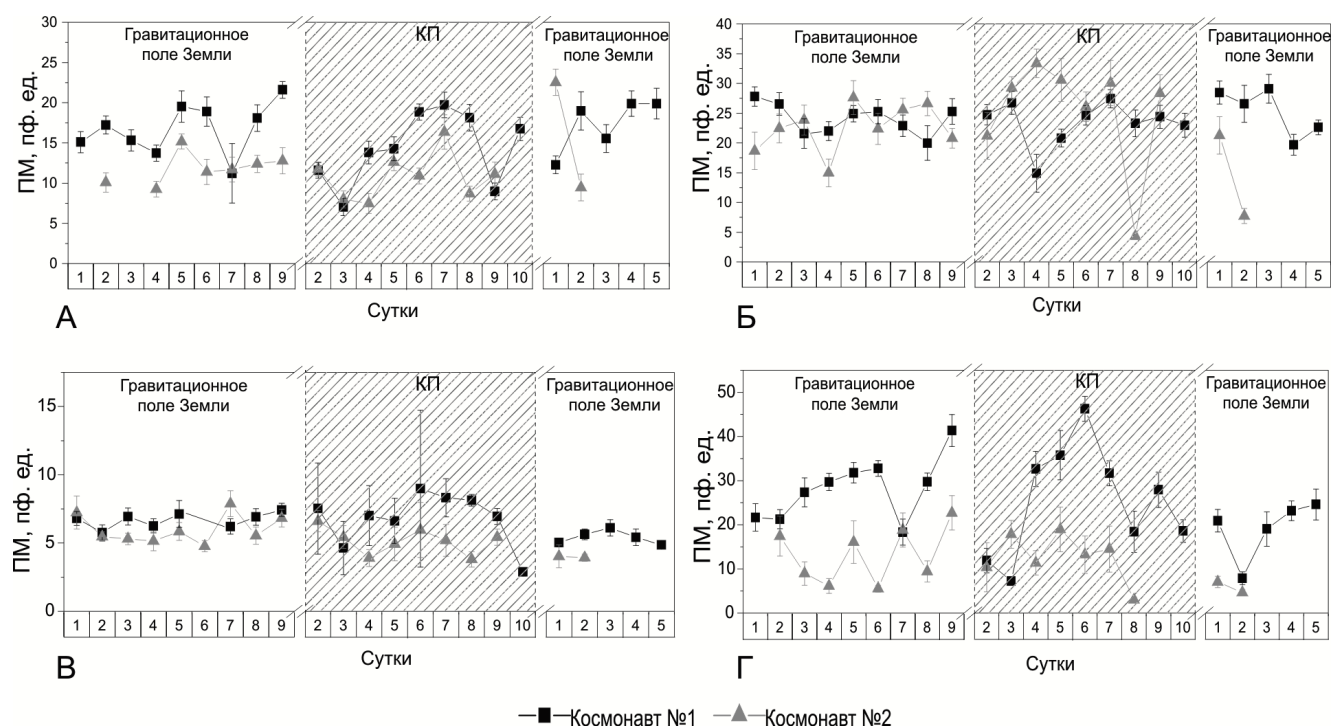


Рис. 2. Динамика среднего уровня тканевой перфузии на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА».

А – в области висков; Б – в ладонной области дистальной фаланги III пальца кисти руки; В – в области наружной поверхности предплечья; Г – в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы

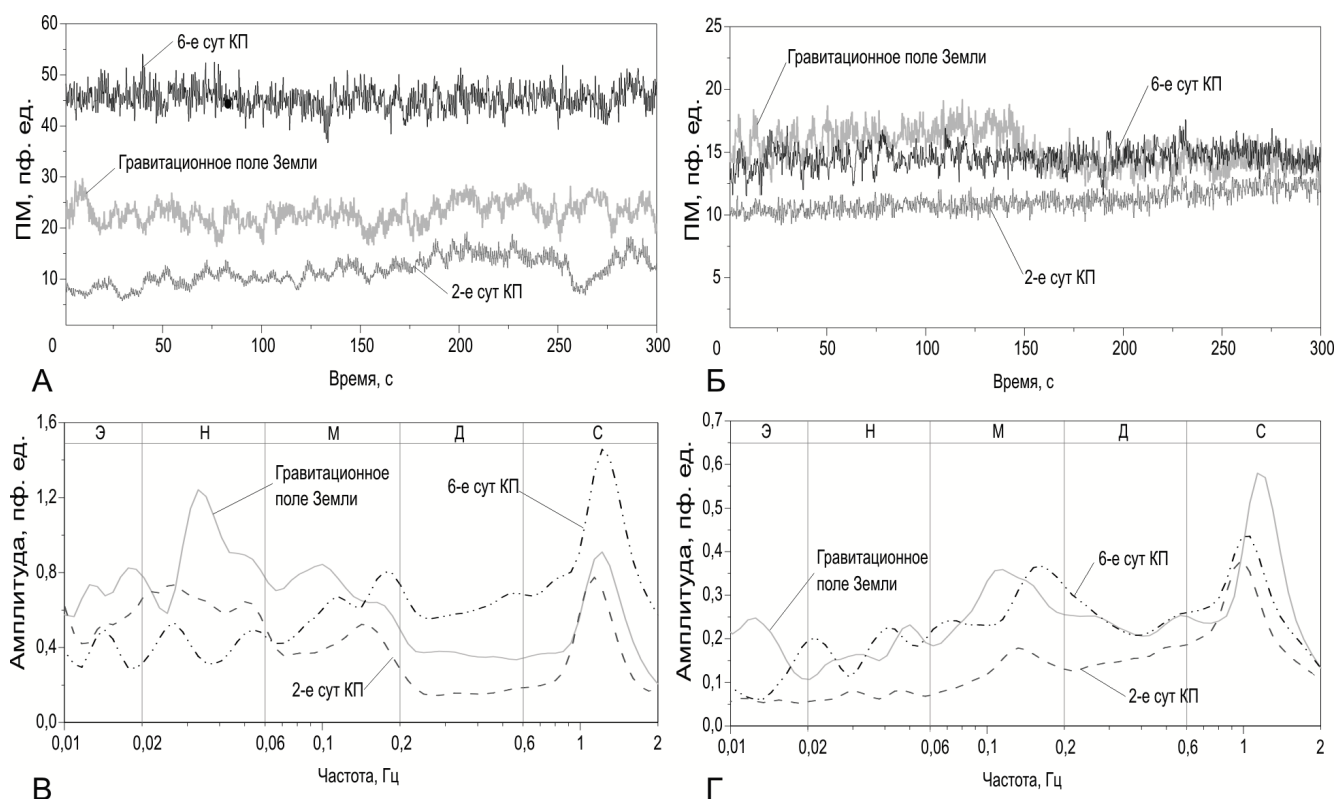


Рис. 3. Показатель микроциркуляции крови и результаты амплитудно-частотного вейвлет-анализа колебаний микрокровотока на различных этапах КЭ (гравитационное поле Земли, 2-е и 6-е сутки КП) для космонавта № 1.

А – ПМ в подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы; Б – ПМ в височной области головы; В – вейвлет-спектр в подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы; Г – вейвлет-спектр колебаний в височной области головы

механизмов [14]. На этом фоне амплитуда сердечных колебаний микрокровотока, которая определяет объемное кровенаполнение микрососудистого русла, на 2-е сутки КП снижается, а на 6-е сутки возрастает, превышая значения, зарегистрированные при наземных измерениях. На 6-е сутки КП высокий уровень тканевой перфузии обусловлен повышенным притоком артериальной крови по сравнению со 2-ми сутками КП. Функциональная перестройка регуляторных механизмов модуляции микрокровотока направлена на поддержание тканевого гомеостаза в новых для организма условиях функционирования.

В данном контексте интересны результаты реакции тканевой перфузии в коже висков (см. рис. 3, Б), так как ввиду перемещения крови в краниальном направлении во время КП данная область подвергается наибольшему гемодинамическим нагрузкам. В «острую» фазу функциональной перестройки системы МЦК (2-е сутки КП) уровень тканевой перфузии в височной области головы снижается почти в 1,5 раза относительно наземных значений с последующим восстановлением до предполетных значений на 6-е сутки КП. Амплитудно-частотный вейвлет анализ зарегистрированных данных (см. рис. 3, Г) демонстрирует снижение активности всех механизмов регуляции МЦК на 2-е сутки КП с наиболее значимыми изменениями в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах и постепенное восстановление параметров к 6-м суткам.

На рис. 4 приведены результаты исследований тканевой перфузии в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы и ладонной поверхности дистальной фаланги III пальца руки с амплитудно-частотным вейвлет-анализом колебаний для космонавтов № 1 и № 2 на 3-и сутки КП. Данные области кожи имеют схожее строение микрососудистого русла, характеризующееся обилием поверхностно расположенных артериоло-венулярных анастомозов, в которых доминирует нейрогенный механизм регуляции тонуса микрососудов, но в условиях микрогравитации пальцы рук и ног испытывают различные гемодинамические нагрузки.

Стоит отметить, что космонавт № 1 адаптировался к условиям микрогравитации без компенсаторных устройств, а космонавт № 2 применял специальное профилактическое средство «Браслет» [19], которое снижает перемещение крови от нижних конечностей в краниальном направлении. Как видно на рис. 4, А, у космонавта № 2 на фоне применения компенсаторного средства «Браслет» в нижних конечностях отмечаются высокоамплитудные колебания кровотока частотой около 1 колебания в

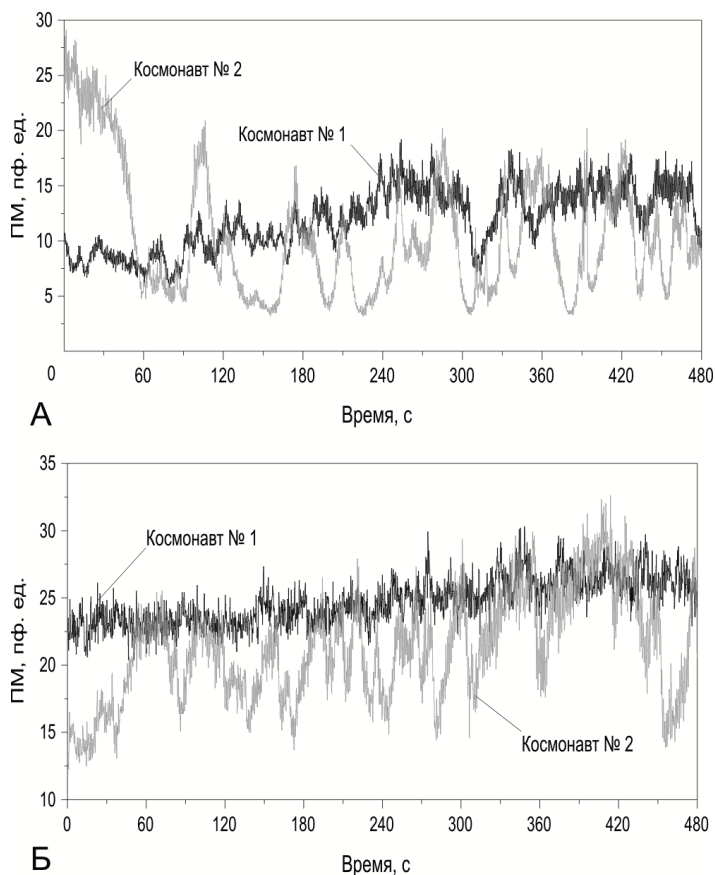


Рис. 4. Показатель микроциркуляции крови у космонавтов на 3-и сутки КП.

А – для I пальца стопы; Б – для III пальца руки

минуту, которые обусловлены NO-опосредованной регуляцией микрососудистого эндотелия. У космонавта № 1 (без применения компенсаторного средства «Браслет») в нижних конечностях отмечаются высокоамплитудные вазомоции частотой 1 раз в 3–4 мин, что, предположительно, связывают с эндотелиальным гиперполяризующим фактором [17]. В пальцах рук у космонавта № 2, как и в ногах, отмечается высокая вазомоторная активность всех тонус-формирующих механизмов (см. рис. 4, Б). На ЛДФ-грамме отчетливо видны высокоамплитудные колебания эндотелиального, нейрогенного и миогенного механизмов модуляции микрокровотока. У космонавта № 1 вазомоторная активность ниже, но уровень тканевой перфузии незначительно выше.

На основании представленных данных можно предположить, что применение средств нормализации перераспределения крови во время КП приводит к увеличению вазомоторной активности тонус-формирующих механизмов регуляции кровотока.

Дополнительно была оценена динамика изменений амплитуд регуляторных механизмов тканевой перфузии на протяжении всего КЭ. Результаты

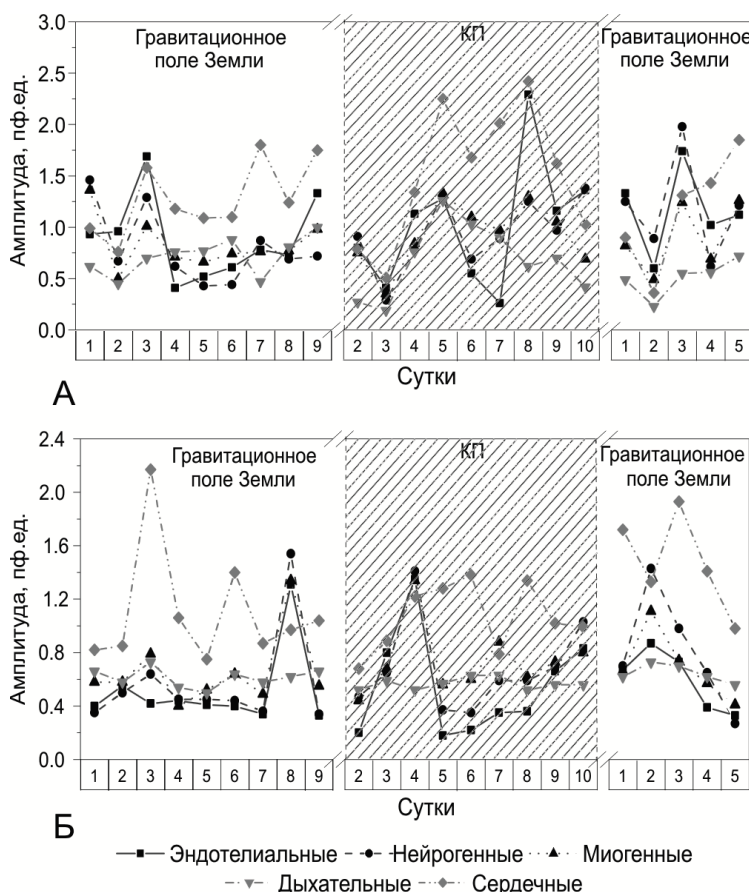


Рис. 5. Динамика амплитуд колебаний тканевой перфузии на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА» для космонавта № 1.

А – для I пальца стопы; Б – для III пальца руки

анализа для космонавта № 1 в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы и ладонной поверхности дистальной фаланги III пальца руки представлены на рис. 5.

Согласно рис. 5, А, на 3-и сутки КП происходит одновременное снижение всех амплитуд колебаний тканевой перфузии, после чего амплитуды колебаний увеличиваются вплоть до 5 сут КП включительно. Снижение модуляции кровотока на фоне общего снижения тканевой перфузии может быть связано с уменьшением объема циркулирующей крови в нижних конечностях на фоне перераспределения крови в краниальном направлении в период острой адаптации к условиям микрогравитации. Последующее увеличение (4–5-е сутки КП) амплитуд колебаний свидетельствует о постепенной адаптации организма к новым условиям за счет увеличения активности модуляции кровотока на фоне артериального притока (доминирование амплитуд сердечных колебаний с 4-х по 9-е сутки КП). Амплитуды миогенных колебаний возрастают на 4–5-е сутки КП и остаются на высоком уровне по сравнению с 2–3-ми сутками КП, что характеризует

увеличение числа функционирующих капилляров и увеличение притока артериальной крови в нутритивное русло, компенсируя недостаток трофического обеспечения нижних конечностей в условиях невесомости.

Амплитуды колебаний тканевой перфузии в пальцах рук (см. рис. 5, Б) в меньшей степени подвержены изменениям во время КП, что может быть связано как с их гемодинамическим постоянством ввиду расположения в центральной плоскости тела, так и с высокой функциональной активностью во время КП, что нивелирует негативное влияние микрогравитации на организм космонавта. При этом на 4-е сутки КП наблюдали увеличение амплитуд колебаний до максимальных значений, что может быть следствием гемодинамической перестройки организма при адаптации к условиям микрогравитации.

Можно отметить некоторое расхождение полученных в настоящем исследовании данных с ранее зарегистрированными результатами оценки МЦК при «сухой» иммерсии. Так, например, некоторые авторы [10, 20] отмечают увеличение тканевой перфузии, увеличение амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний микроциркуляторного кровотока. Возможными причинами выявленных изменений функционирования системы МЦК при «сухой» иммерсии могут являться как температурные условия, приводящие к нагреву исследуемой области, так и горизонтальное положение тела волонтеров при проведении исследования, а также краткосрочность моделирования эффектов невесомости (в основном 3–5 сут).

Выводы

1. Впервые в мире проведено исследование МЦК в различных регионах кожи (голова, палец руки, предплечье, палец стопы) в условиях реального КП с применением портативных лазерных флоуметров. Удалось зарегистрировать изменения в микроциркуляторном русле в различных участках кожи как у профессионального космонавта, так и у космического туриста, не имеющего предшествующего опыта полетов.

2. Наиболее значительные изменения параметров МЦК происходят в височной области головы и в области нижних конечностей на 2-е и 3-и сутки КП и характеризуются значимым снижением тканевой перфузии и повышением сосудистого тонуса с постепенным восстановлением предполетных значений к 6-м суткам КП.

3. Полученные в условиях микрогравитации результаты демонстрируют существенные функциональные различия кожной перфузии в пальцах верхних и нижних конечностей 2 космонавтов, что может быть обусловлено как уровнем профессиональной подготовки, так и применением средств компенсации. Применение средств нормализации перераспределения крови во время КП космическим туристом привело к увеличению вазомоторной активности тонус-формирующих механизмов регуляции кровотока как в нижних, так и в верхних конечностях.

4. Для более подробного изучения физиологических реакций при адаптации системы МЦК к условиям микрогравитации и уточнения влияния долгосрочных изменений на организм космонавтов требуется проведение дальнейших исследований МЦК и других параметров сердечно-сосудистой системы в реальных условиях КП.

Авторы выражают благодарность космонавтам Александру Мисуркину, Юсаку Маедзава и Йоэо Хирано за участие в космическом эксперименте «ЛАЗМА», а также компании Space Adventures Ltd. (М. Губайдуллин, Д. Шапиро) и ПАО «РКК "Энергия"» за помощь в организации эксперимента.

Список литературы

1. Gzenko O.G., Shulzhenko E.B., Turchaninova V.F. et al. Central and regional hemodynamics in space flights // *Acta Astronaut.* 1988. V. 17. № 2. P. 173–179.
2. Фомина Г.А., Котовская А.Р., Темнова Е.В. Динамика сердечно-сосудистых изменений в различные периоды длительного пребывания человека в невесомости // *Авиакосм. и экол. мед.* 2009. Т. 43. № 3. С. 11–16.
3. Fomina G.A., Kotovskaya A.R., Temnova E.V. Dynamics of the human cardiovascular responses in different periods of long-term exposure in weightlessness // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2009. V. 43. № 3. P. 11–16.
4. Jirak P., Mirna M., Rezar R. et al. How spaceflight challenges human cardiovascular health // *Eur. J. of Preventive Cardiol.* 2022. V. 29. № 10. P. 1399–1411.
5. Baevsky R.M., Funtova I.I., Luchitskaya E.S. et al. The effects of long-term microgravity on autonomic regulation of blood circulation in crewmembers of the International space station // *Cardiometry.* 2014. № 5. P. 35–39.
6. Mohammadyari P., Gadda G., Taibi A. Modelling physiology of haemodynamic adaptation in short-term microgravity exposure and orthostatic stress on Earth // *Scientific Rep.* 2021. V. 11. № 1. e4672.
7. Gallo C., Ridolfi L., Scarsoglio S. Cardiovascular deconditioning during long-term spaceflight through multiscale modeling // *Microgravity.* 2020. V. 6. № 1. P. 27.
8. Navasiolava N.M., Custaud M.-A., Tomilovskaya E.S. et al. Long-term dry immersion: review and prospects // *Eur. J. of Appl. Physiol.* 2011. V. 111. P. 1235–1260.
9. Watenpaugh D.E. Analogs of microgravity: head-down tilt and water immersion // *J. of Appl. Physiol.* 2016. V. 120. № 8. P. 904–914.
10. Mekari S., Murphy R.J., MacKinnon A.R. et al. The impact of a short-period head-down tilt on executive function in younger adults // *Scientific Rep.* 2022. V. 12. № 1. e20888.
11. Пашкова Д.В., Попова Ю.А., Федорович А.А. Функциональное состояние микроциркуляторного русла кожи здоровых женщин в условиях «сухой» иммерсии // *Авиакосм. и экол. мед.* 2023. Т. 57. № 2. С. 39–46.
12. Pashkova D.V., Popova Yu.A., Fedorovich A.A. Functional state of the skin microcirculation bed in healthy females in the condition of dry immersion // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2023. V. 57. № 2. P. 39–46.
13. Ansari R.R., Manuel F.K., Suh K.I. et al. Choroidal blood flow measurements in zero gravity (space-like) environment using laser-doppler flowmetry // *Investigative Ophthalmol. & Visual Sci.* 2003. V. 44. № 13. P. 960–960.
14. Navasiolava N., Yuan M., Murphy R. et al. Vascular and microvascular dysfunction induced by microgravity and its analogs in humans: mechanisms and countermeasures // *Front. in Physiol.* 2020. V. 11. P. 952.
15. Lloret J., Arnaud L., Gauquelin G. et al. Cardiospace French Chinese cooperation in gravitational physiology // *Front. in Physiol.* 2019. Conference Abstract: 39th ISGP Meeting & ESA Life Sciences Meeting.
16. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: Руководство для врачей. М., 2013.
17. Krupatkin A.I., Sidorov V.V. Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems: fluctuations, information, nonlinearity: A guide for doctors. Moscow, 2013.
18. Norsk P. Blood pressure regulation IV: adaptive responses to weightlessness // *Eur. J. of Appl. Physiol.* 2014. V. 114. P. 481–497.
19. Dunaev A. Wearable devices for multimodal optical diagnostics of microcirculatory-tissue systems: application experience in the clinic and space // *J. of Biomed. Photonics & Engineering.* 2023. V. 9. № 2. P. 1–10.
20. Kvandal P., Landsverk S.A., Bernjak A. et al. Low frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin // *Microvasc. Res.* 2006. V. 72. № 3. P. 120–127.
21. Крупаткин А.И. Значение колебательных процессов в диагностике состояния микроциркуляторно-тканевых систем // *Физиология человека.* 2018. Т. 4. № 5. С. 103–114.
22. Krupatkin A.I. Oscillatory processes in the diagnosis of the state of microvascular-tissue systems // *Fiziologiya cheloveka.* 2018. V. 44. № 5. P. 581–591.
23. Богомолов В.В., Гончаров И.Б., Богатова Р.И. и др. Медицинское обеспечение космонавтов-непрофессионалов, совершивших кратковременные космические полеты на Международной космической станции // *Авиакосм. и экол. мед.* 2008. Т. 42. № 1. С. 15–19.
24. Bogomolov V.V., Goncharov I.B., Bogatova R.I. et al. Medical provisions for non-career cosmonauts on

short-duration flights to the International Space Station // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2008. V. 42. № 1. P. 15–19.

20. Памова А.П. Микроциркуляторное звено сердечно-сосудистой системы человека при моделировании воздействия факторов космического полета: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2019.

Pamova A.P. Microcirculatory link of the human cardiovascular system in modeling the effects of space flight factors: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata meditsinskikh nauk. Moscow, 2019.

Поступила 04.05.2023

INVESTIGATION OF BLOOD MICROCIRCULATION IN MICROGRAVITY WITH THE USE OF PORTABLE LASER DOPPLER FLOWMETERS

**Dunaev A.V.¹, Loktionova Yu.I.¹, Zharkikh E.V.¹,
Fedorovich A.A.^{2,3}, Sidorov V.V.⁴, Vasin A.V.⁵,
Dubinin V.I.⁵**

¹Orel State University

²National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow

³Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

⁴SPE "LAZMA" Ltd, Moscow

⁵Yu.A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center, Zvyozdny gorodok, Moscow region

The paper reports the results of blood microcirculation studies in microgravity using portable laser analyzer LAZMA PF.

Two cosmonauts (C-1 and C-2) performed pre-launch and in-flight (9 days) 8-minute sessions with the use of 2 portable flowmeters symmetrically attached to the temporal skin, palmer sides of distal phalanxes III, forearm superficies and planter surfaces of toe distal phalanxes I.

In C-1, mean perfusion rate in toes decreased more than in half due to blood redistribution toward the upper body on the first two days in orbit and then, by way of adaptation, regained normal mean values. In C-2, compression of the proximal regions of lower extremities to induce blood deposition caused high-amplitude NO-dependent oscillations at about 1/min. On the background of adaptation during flight days 2–3, high-amplitude endothelial vasomotions in C-1 (one oscillation every 3–4 minutes) can be associated with an endothelial hyperpolarizing factor. In whole, on flight days 2–3 adaptation of the microcirculation system, particularly pronounced in the temporal and planter tissues, was characterized by a significant reduction of perfusion and increased vascular tone. Baseline prelaunch values were regained by flight day 6.

For the first time, a research technique was proposed under microgravity conditions and data were obtained on the state of blood microcirculation of astronauts during the period of acute adaptation to microgravity conditions and readaptation after flight completion.

Key words: space flight, blood microcirculation, tissue perfusion, laser Doppler flowmetry, portable devices, microgravity.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 47–54.

УДК 612.821

СРАВНЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЭГ ПОКОЯ В ХОДЕ 21-СУТОЧНОЙ «СУХОЙ» ИММЕРСИИ И 21-СУТОЧНОЙ АНТИОРТОСТАТИЧЕСКОЙ ГИПОКИНЕЗИИ

Украинцева Ю.В.^{1, 2}, Журина Ю.Д.¹, Лазарев И.Е.¹, Томиловская Е.С.¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

E-mail: ukraintseva@yandex.ru

Проведено исследование изменений ЭЭГ в 2 наземных моделях гипогравитации – в 21-суточной «сухой» иммерсии (СИ) и 21-суточной антиортостатической гипокинезии (АНОГ).

В исследовании СИ участвовали 10 здоровых добровольцев, в АНОГ – 6. ЭЭГ регистрировали до начала СИ и АНОГ, а также на 5-е и 17-е сутки пребывания в СИ либо в АНОГ. Спектральную мощность ЭЭГ анализировали с помощью быстрого преобразования Фурье. Сравнивали изменения спектральной мощности ЭЭГ в ходе АНОГ и СИ.

Результаты исследования показали, что некоторые изменения ЭЭГ в ходе СИ и АНОГ были сходными. В частности, в обеих моделях на 5-е сутки воздействия выявлено снижение активности в тета1- и бета-диапазонах (в СИ – бета1, а в АНОГ – бета2). Однако в СИ снижение медленных ритмов было более выраженным, чем в АНОГ: помимо тета1 снижалась мощность тета2-, дельта1- и дельта2-ритмов. Различия между двумя экспериментами заключались также в том, что на 17-е сутки АНОГ мощность ЭЭГ в тета- и бета-диапазонах повысилась, достигнув исходного уровня, а на 17-е сутки СИ спектральная мощность медленных ритмов все еще оставалась сниженной.

Ключевые слова: «сухая» иммерсия, антиортостатическая гипокинезия, ЭЭГ.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 55–61.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-55-61

Нейрофизиологические механизмы адаптации к изменению гравитационных влияний до сих пор недостаточно изучены. Как правило, эффекты гипогравитации на активность головного мозга изучают с помощью электроэнцефалографии – метода регистрации электрической активности коры мозга, который доступен и в условиях космического полета, и в наземных моделях гипогравитации.

Исследования, посвященные изменениям электрической активности мозга в космосе, все еще немногочисленны. В одном исследовании во время космического полета было выявлено увеличение спектральной мощности альфа-ритма в состоянии покоя [1]. При этом было также отмечено усиление десинхронизации альфа-диапазона в ответ на

открытие глаз [1]. Аналогичные данные о более выраженной реактивной десинхронизации альфа-ритма в космосе были выявлены авторами работы [2]. Третье исследование показало повышенную мощность тета-активности при выполнении зрительно-моторной задачи на Международной космической станции (МКС) по сравнению с ее выполнением в земных условиях [3].

Несколько лучше изучены изменения ЭЭГ в наземных моделях гипогравитации, хотя результаты этих исследований довольно противоречивы.

Одной из моделей, позволяющей в наземных экспериментах воспроизводить некоторые эффекты космического полета, является модель «сухой» иммерсии (СИ) [4]. Еще одна наземная модель – антиортостатическая гипокинезия (АНОГ) [5]. Обе модели воспроизводят такие условия космического полета, как гипокинезия и механическая разгрузка, а также индуцируемое невесомостью перераспределение жидкости в организме, при котором она смещается в верхнюю половину тела. Метод СИ, помимо этого, воспроизводит также опорную разгрузку, характерную для невесомости. Как следствие пребывания в СИ и АНОГ запускает ряд перестроек, направленных на адаптацию к новым условиям существования. Эти перестройки приводят к изменениям в регуляции обменных процессов, сердечно-сосудистой системы (ССС), мышечного тонуса и водно-солевого баланса [5, 6]. Мы предполагаем, что сравнение нейрофизиологических процессов во время пребывания в СИ и АНОГ может помочь лучше понять центральные механизмы адаптации к гипогравитации.

Изменения ЭЭГ, зарегистрированные в разных исследованиях АНОГ, оказались различными. В некоторых работах эффект АНОГ проявлялся в снижении спектральной мощности ЭЭГ: в альфа- и бета-диапазонах [7] либо в большинстве диапазонов, как быстрых, так и медленных [8, 9]. В других исследованиях в АНОГ был выявлен рост спектральной мощности ЭЭГ: медленных (дельта- и тета-) ритмов [10], либо тета-, альфа1- и бета-ритмов [11].

В условиях СИ также отмечались различные сдвиги ЭЭГ: как увеличение мощности альфа-ритма [12], так и ее снижение на фоне усиления тета-активности [13].

Различия в результатах этих исследований, по-видимому, объясняются разной длительностью эксперимента, в частности, в некоторых из них ЭЭГ регистрировали в течение первых минут и часов действия гипогравитации [7, 8, 10], в других – на 2-е сутки [13], в третьих – на 4–5-е сутки [12]. Соответственно выявленные изменения ЭЭГ могли отражать преимущественно ранние либо поздние этапы адаптации к условиям эксперимента.

В данном исследовании мы поставили своей целью изучить изменения ЭЭГ на 5-е и 17-е сутки СИ и АНОГ одинаковой длительности – 21 сут. Пятые сутки воздействия были выбраны, поскольку, с одной стороны, в этот период испытуемые перестают ощущать дискомфорт, характерный для первых суток пребывания в гипогравитации, с другой – в это время все еще продолжаются перестройки в регуляции ССС и обмена веществ; 17-е сутки были выбраны как период устойчивой адаптации организма к моделируемой гипогравитации [6].

Методика

Исследование было проведено на базе уникальной научной установки ГНЦ РФ – ИМБП РАН «Медико-технический комплекс для отработки инновационных технологий космической биомедицины в интересах обеспечения орбитальных и межпланетных полетов, а также развития практического здравоохранения» в соответствии с требованиями Комиссии по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протоколы № 483 от 3 августа 2018 г. и № 621 от 8 августа 2022 г.). Все испытуемые подписали Информированное согласие перед экспериментом.

21-суточная СИ

В исследовании участвовали 10 здоровых добровольцев (мужчины, возраст $29,30 \pm 1,19$ года), без каких-либо неврологических или психических нарушений. ЭЭГ регистрировали от 64 электродов, с использованием системы Neuroscan2 (Compumedics™), полоса пропускания 0,15–400 Гц, частота оцифровки 1000 Гц. Заземляющий электрод располагался рядом с Fz-электродом. В качестве референтного отведения использовали объединенные ушные электроды. Соппротивление всех каналов составляло не более 20 кОм.

ЭЭГ регистрировали при стандартном освещении за 2 сут до начала СИ, на 5-е и 17-е сутки СИ примерно в одно и то же вечернее время (18.00–21.00). До начала СИ регистрацию проводили в позе лежа на кушетке, в ходе иммерсионной воздействия во время регистрации ЭЭГ испытуемый находился в иммерсионной ванне.

Испытуемым давали инструкцию расслабить все мышцы и лежать неподвижно с закрытыми глазами. Регистрация ЭЭГ длилась от 2 до 5 мин.

21-суточная АНОГ

В исследовании участвовали 6 здоровых добровольцев (мужчины, возраст $28,83 \pm 1,25$ года), без каких-либо неврологических или психических нарушений. ЭЭГ регистрировали от 11 электродов (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2), с применением электроэнцефалографа NVX36 (ООО «Медицинские Компьютерные Системы»), полоса пропускания составляла 0,15–70 Гц, частота оцифровки 250 Гц. Заземляющий электрод располагался рядом с Fz-электродом. В качестве референтного отведения использовали объединенные ушные электроды. Соппротивление всех каналов составляло не более 20 кОм.

ЭЭГ регистрировали при стандартном освещении в позе лежа на кушетке за 4 сут до начала АНОГ, а также во время АНОГ – на 5-е и 17-е сутки. До начала АНОГ запись проводили в утренние часы (9.00–12.00), во время АНОГ – после обеда (15.00–18.00). Испытуемым давали инструкцию расслабить все мышцы и лежать неподвижно с закрытыми глазами. Регистрация ЭЭГ длилась от 2 до 5 мин.

Анализ ЭЭГ

При анализе ЭЭГ, зарегистрированной во время исследования СИ, из записи удаляли все каналы, кроме 11 отведений: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2. После этого частоту оцифровки понижали до 250 Гц.

И кривые, зарегистрированные в ходе исследования СИ, и кривые, зарегистрированные во время исследования АНОГ, отфильтровывали в диапазоне от 0,5 до 30 Гц. В каждой записи выделяли по 5 безартефактных эпох длительностью 5 с. Безартефактные эпохи выделялись визуально одним и тем же экспертом. Далее их анализировали с помощью быстрого преобразования Фурье. Показатели спектральной мощности отдельных эпох усредняли внутри каждой записи. Спектральную мощность анализировали в 9 частотных диапазонах: дельта1 (0,5–2 Гц), дельта2 (2–4 Гц), тета1 (4–6 Гц), тета2 (6–8 Гц), альфа1 (8–10 Гц), альфа2 (10–12 Гц), альфа3 (12–14 Гц), бета1 (14–24 Гц) и бета2 (24–30 Гц).

Статистический анализ

Выраженность эффектов СИ и АНОГ в ЭЭГ по-прежнему оценивали с помощью непараметрического теста Фридмана для повторных измерений (ANOVA Фридмана). В каждом эксперименте сравнивали спектральную мощность ЭЭГ в 3 экспериментальных сессиях. Для апостериорного анализа использовали непараметрический критерий Вилкоксона.

Помимо влияния СИ и АНОГ на спектральную мощность в отдельных областях коры, оценивали также изменения лобно-затылочного градиента мощности и ее асимметрии.

Результаты и обсуждение

21-суточная СИ

Тест Фридмана для повторных измерений выявил значимое влияние СИ на все медленные ритмы ЭЭГ. Достоверные изменения были выявлены в дельта1-диапазоне (в теменных отделах – $\chi^2 = 7,54$, $p = 0,023$), в дельта2- (в центральных отделах – $\chi^2 = 6,51$, $p = 0,038$; в теменных – $\chi^2 = 11,44$, $p = 0,003$; в затылочных – $\chi^2 = 6,82$, $p = 0,033$), тета1- (в лобных отделах – $\chi^2 = 10,21$, $p = 0,006$; в центральных – $\chi^2 = 7,13$, $p = 0,028$; в теменных – $\chi^2 = 6,82$, $p = 0,033$), а также в тета2- (в лобных областях – $\chi^2 = 6,20$, $p = 0,045$ и в теменном отведении P3 – $\chi^2 = 9,80$, $p = 0,007$).

Среди быстрой активности значимые эффекты СИ выявлены в альфа3-диапазоне (в лобном отведении F3 – $\chi^2 = 6,20$, $p = 0,045$), а также в бета1- (в центральном отведении C4 – $\chi^2 = 6,20$, $p = 0,045$).

Апостериорный анализ с помощью критерия Вилкоксона показал, что наиболее выраженные изменения спектральной мощности ЭЭГ происходят между фоновыми исследованиями и 5-ми сутками иммерсии (рис. 1). На 5-е сутки выявлено статистически значимое снижение спектральной мощности медленных ритмов в большинстве областей коры: в дельта1-диапазоне (различия статистически значимы в Pz), дельта2- (значимы в Cz, C4, P3, Pz, P4, O1 и O2), тета1- (в F3, Fz, Cz, C4, P3) и тета2- (в F3, F4 и P3). Помимо медленных ритмов снижалась также мощность бета1-диапазона (в C4).

На 17-е сутки воздействия по сравнению с 5-ми сутками отмечено повышение спектральной мощности в альфа3-диапазоне (в F3). При этом по сравнению с фоновой записью на 17-е сутки мощность медленных ритмов все еще оставалась сниженной: в дельта1-диапазоне (в P4), дельта2- (в Cz, P4 и O1), тета1- (в F3, Fz, F4, C4, P3) и тета2- (в P3).

Статистически значимых изменений лобно-затылочного градиента спектральной мощности и ее асимметрии в ходе СИ выявлено не было.

21-суточная АНОГ

Во время АНОГ изменения ЭЭГ были не такими выраженными, как в СИ. Тест Фридмана для повторных измерений выявил значимое влияние АНОГ только на активность в тета1-диапазоне (в лобных отделах – $\chi^2 = 6,33$, $p = 0,042$) и в бета2- (в центральном отведении C4 – $\chi^2 = 6,33$, $p = 0,042$).

На 5-е сутки АНОГ апостериорный анализ выявил снижение спектральной мощности в тета1-диапазоне (различия статистически значимы в F3 и Fz), а также снижение мощности бета2-ритма (в C4). На 17-е сутки АНОГ и мощность тета1- (в F3, Fz и F4), и мощность бета2- (в Pz) повысилась, вернувшись к исходным значениям (рис. 2).

Статистически значимых изменений лобно-затылочного градиента спектральной мощности и ее асимметрии в ходе АНОГ выявлено не было.

Результаты исследования показали, что изменения ЭЭГ в СИ и АНОГ демонстрируют некоторые черты сходства. В частности, для обеих моделей на 5-е сутки воздействия выявлено снижение активности в тета1- и бета-диапазонах (в СИ – бета1-, а в АНОГ – бета2-). Однако в СИ снижение медленных ритмов было более выраженным, чем в АНОГ – помимо тета1- уменьшалась также мощность тета2-, дельта1- и дельта2-ритмов. Различия между 2 воздействиями заключались также в том, что на 17-е сутки АНОГ мощность ЭЭГ в тета- и бета-диапазонах повысилась и более не отличалась от исходных значений, а в СИ и на 17-е сутки спектральная мощность медленных ритмов все еще оставалась сниженной.

Уменьшение спектральной мощности ЭЭГ при моделировании гипогравитации уже было описано ранее. В частности, во время длительной АНОГ выявлено снижение дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмов [9], причем это снижение отмечалось вскоре после начала АНОГ и сохранялось до ее окончания. Авторы связывают это тем, что АНОГ вызывает смещение мозга вверх и назад, повышение плотности мозговой ткани в области вертекса и уменьшение объема прилегающих субарахноидальных пространств [14].

Помимо этого, в одном из исследований, проведенных в условиях СИ [12], на 4–5-е сутки воздействия была отмечена тенденция к снижению дельта-активности, хотя основным результатом этой работы было статистически значимое увеличение мощности альфа-ритма в ходе СИ. Однако в другом исследовании изменения ЭЭГ в условиях СИ были почти противоположными: было обнаружено снижение мощности альфа-ритма и усиление тета-активности [13]. Различное влияние СИ на ЭЭГ, выявленное в этих 2 работах, может объясняться тем, что авторы работы [13] регистрировали ЭЭГ на 2-е сутки СИ, и описанные ими изменения ЭЭГ могли быть связаны с ранними этапами адаптации к условиям эксперимента. В частности, первые 3–4 сут пребывания в СИ сопровождаются болью и дискомфортом, связанными с перераспределением тонуса мышц спины и растяжением позвоночника [15]. Повышение медленных (дельта- и тета-) ритмов отмечалось также и в первые сутки АНОГ [10].

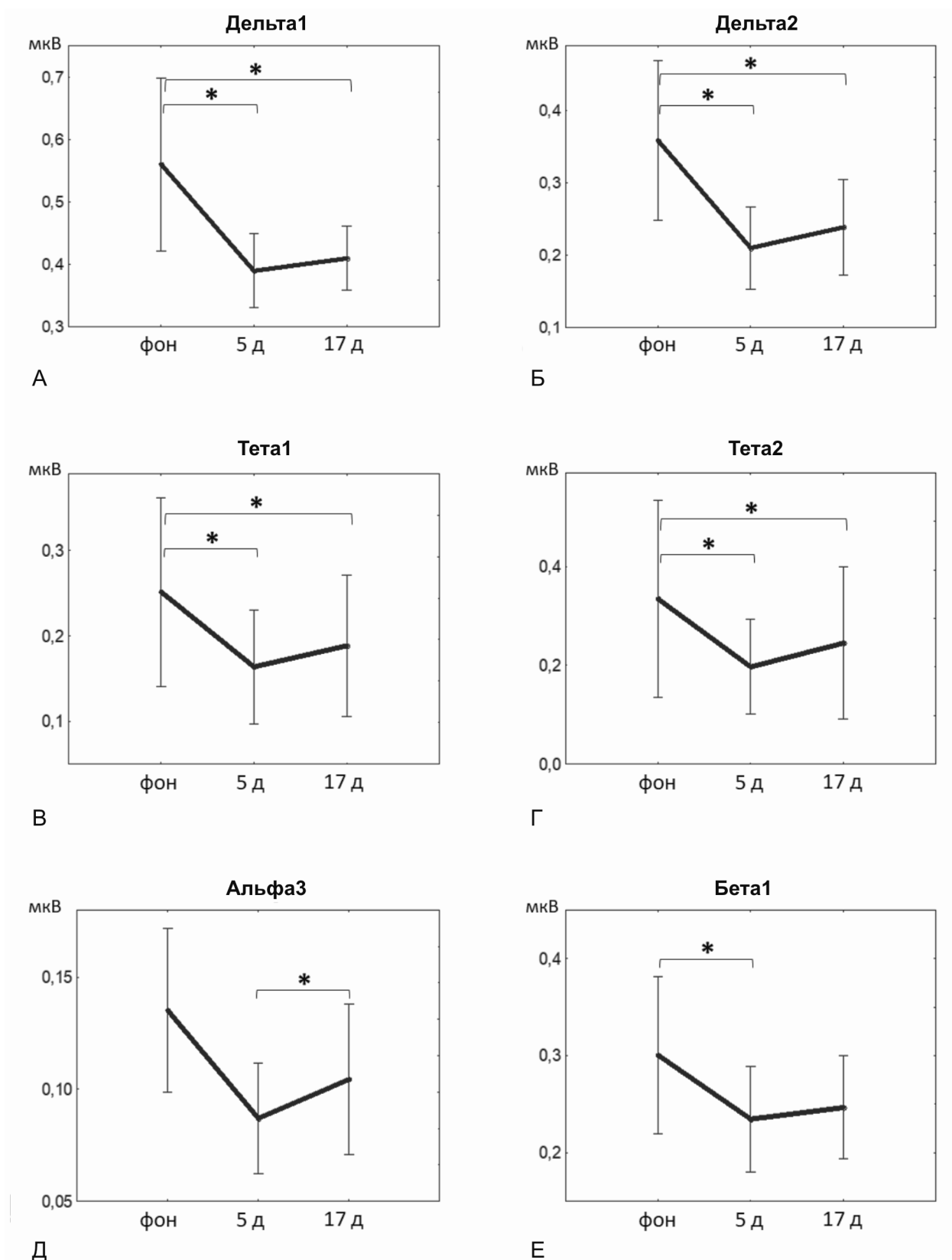


Рис. 1. Изменения спектральной мощности ЭЭГ во время 21-суточной СИ в дельта1-, дельта2-, тета1-, тета2-, альфа3- и бета1-диапазонах.

На графиках – средние значения мощности и ошибка среднего. Фон – за 2 сут до начала СИ.

Здесь и на рис. 2: ось ординат – спектральная мощность в микровольтах; * – по критерию Вилкоксона различия значимы при $p < 0,05$

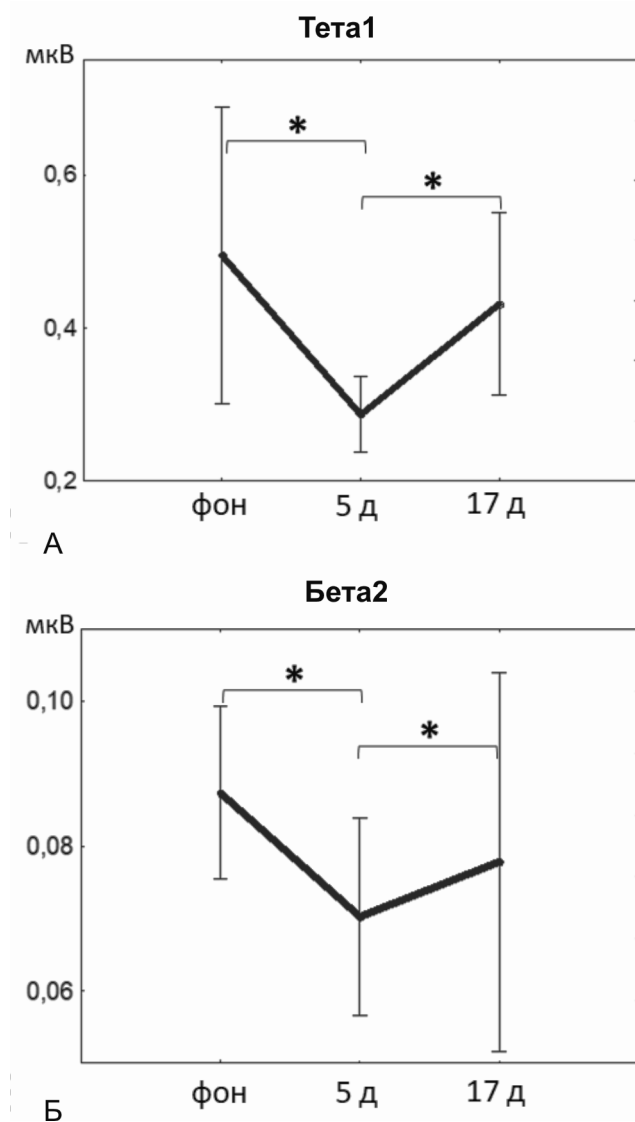


Рис. 2. Изменения спектральной мощности ЭЭГ во время 21-суточной АНОГ в тета1- и бета2-диапазонах. На графиках – средние значения мощности и ошибка среднего. Фон – за 4 сут до начала АНОГ

Снижение спектральной мощности альфа-ритма как ранний эффект антиортостатического изменения положения тела показано в работе [7]. Хотя наиболее воспроизводимым ранним эффектом гипогравитации, описанным в ряде работ [7–9], является угнетение бета-активности. Оно выявлено и во время невесомости в параболическом полете [7], и сразу после принятия лежачего положения с наклоном головы в -6° [8].

Пониженная спектральная мощность бета-активности, выявленная нами на 5-е сутки воздействия, по-видимому, тоже может рассматриваться как ранний эффект гипогравитации.

Подавление быстрой ЭЭГ-активности в невесомости связывают с изменением баланса автономной

нервной системы (АНС) [9]. Перемещение значительной части жидкости организма в верхнюю половину тела стимулирует барорецепторы, которые снижают симпатическую активацию [16]. Однако длительное нахождение в невесомости приводит к снижению чувствительности барорецепторов и, напротив, вызывает повышение активности симпатического отдела автономной нервной системы [17, 18]. Это может объяснить рост спектральной мощности бета-активности, выявленный нами на 17-е сутки АНОГ. В СИ усиление бета-ритма оказалось недостоверным, однако на 17-е сутки воздействия наблюдалось повышение мощности альфа3-диапазона (12–14 Гц), который является промежуточным между альфа- и бета-ритмами.

Чем можно объяснить снижение мощности медленных ритмов на 5-е сутки АНОГ и СИ? Прежде всего медленные ритмы рассматриваются как маркеры утомления, локального сна или дремоты. Поэтому их снижение может быть связано с тем, что за 5 сут пребывания в условиях эксперимента испытуемые успели хорошо выспаться. И СИ, и АНОГ сопряжены с известной степенью монотонии, помимо этого, гиподинамия и лежащая поза приводят к тому, что испытуемые спят не только ночью, но могут непроизвольно засыпать и в дневное время. Таким образом, общее время сна в течение эксперимента существенно увеличивается по сравнению со временем сна в их обычной жизни.

Несколько сложнее объяснить выявленные нами различия между изменениями медленной активности в АНОГ и СИ: в СИ обнаружено более значительное снижение медленных ритмов на 5-е сутки эксперимента, чем в АНОГ. Помимо этого, на 17-е сутки АНОГ их спектральная мощность вернулась к фоновым значениям, тогда как в СИ она оставалась более низкой, чем до воздействия. Поскольку спектральная мощность медленных ритмов ЭЭГ подчиняется циркадианной регуляции и сильно зависит от времени суток [19, 20], этот факт можно объяснить тем, что фоновые ЭЭГ перед началом АНОГ, регистрировавшиеся в утреннее время (с 9.00 до 12.00), в силу циркадианных влияний на уровень бодрствования, содержали меньше медленной активности, чем фоновые ЭЭГ перед СИ, которые записывались вечером, после 18.00.

В заключение следует отметить, что данные о влиянии гипогравитации на спектральный состав ЭЭГ, полученные в разных исследованиях, довольно противоречивы. В некоторых случаях эта противоречивость может быть вызвана различной длительностью воздействия гипогравитации, и соответственно преимущественным проявлением ее ранних либо поздних эффектов. Также она может быть вызвана различием контрольных условий, в которых записывались фоновые ЭЭГ перед началом эксперимента. В частности, интерпретацию результатов

исследования [9] затрудняет тот факт, что контрольные записи проводили в положении сидя, поэтому значительное снижение спектральной мощности ЭЭГ, выявленное авторами в ходе АНОГ, могло объясняться не только эффектами гипогравитации, но и влиянием изменения позы. Интерпретацию результатов нашего исследования затрудняет то, что фоновая ЭЭГ перед началом СИ и АНОГ регистрировалась в разное время суток. Соответственно, на результаты могло повлиять различие в уровне бодрствования испытуемых во время фонового исследования. Следует также отметить, что наше исследование проведено на маленьких выборках – 6 и 10 добровольцев, что тоже накладывает ограничения на интерпретацию полученных результатов. В частности, с малым объемом выборок может быть связан большой разброс значений спектральной мощности, который замечен на некоторых рисунках.

Выводы

1. В обеих моделях гипогравитации на 5-е сутки воздействия выявлено снижение спектральной мощности ЭЭГ в тета1- и бета-диапазонах. В СИ снижение медленных ритмов было более выраженным, чем в АНОГ: помимо тета1- снижалась также мощность тета2-, дельта1- и дельта2-ритмов.

2. На 17-е сутки АНОГ спектральная мощность ЭЭГ в тета- и бета-диапазонах повысилась, достигнув исходного уровня, а на 17-е сутки СИ мощность дельта- и тета-ритмов все еще оставалась сниженной.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-15-00435. URL: <https://rscf.ru/project/19-15-00435/>.

Список литературы

1. Cheron G., Leroy A., De Saedeleer C. et al. Effect of gravity on human spontaneous 10-Hz electroencephalographic oscillations during the arrest reaction // *Brain Res.* 2006. V. 1121. № 1. P. 104–16.
2. Cebolla A.M., Petieau M., Dan B. et al. Cerebellar contribution to visuo-attentional alpha rhythm: insights from weightlessness // *Sci. Rep.* 2006. V. 6. № 1. e37824.
3. Petit G., Cebolla A.M., Fattinger S. et al. Local sleep-like events during wakefulness and their relationship to decreased alertness in astronauts on ISS // *NPJ Microgravity.* 2019. V. 2. № 5. P. 10.
4. Shulzhenko E.B., Vil-Vilyams I.F., Khudyakova M.A. et al. Deconditioning during prolonged immersion and possible countermeasures // *Life Sci. Space Res.* 1976. V. 14. P. 289–294.
5. Hargens A.R., Vico L. Long-duration bed rest as an analog to microgravity // *J. Appl. Physiol.* 2016. V. 120. P. 891–903.
6. Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al. Dry immersion as a ground-based model of microgravity physiological effects // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 284.
7. Schneider S., Brümmer V., Carnahan H. et al. What happens to the brain in weightlessness? A first approach by EEG tomography // *Neuroimage.* 2008. V. 42. № 4. P. 1316–1323.
8. Wei J., Yan G., Guan Z. Changes of brain response induced by simulated weightlessness // *Acta Astronaut.* 1992. V. 27. P. 31–36.
9. Brauns K., Friedl-Werner A., Maggioni et al. Head-down tilt position, but not the duration of bed rest affects resting state electrocortical activity // *Front. Physiol.* 2021. V. 12. e638669.
10. Vaitl D., Gruppe H., Stark R. et al. Simulated microgravity and cortical inhibition: a study of the hemodynamic-brain interaction // *Biol. Psychol.* 1996. V. 42. P. 87–103.
11. Han D.X., Liu Y.H., Zhou C.D. et al. Effect of head-down bed rest on human EEG // *Space Med. Eng. (Beijing).* 2001. V. 14. № 3. P. 168–171.
12. Lazarev I.E., Tomilovskaya E.S., Kozlovskaya I.B. Resting state brain activity during long-term dry immersion // *Aerospace Med. and Hum. Perform.* 2018. V. 89. № 7. P. 642–647.
13. Кузнецова Г.Д., Габова А.В., Лазарев И.Е. и др. Частотно-временная структура электроэнцефалограммы человека в условиях искусственной гипогравитации: модель «сухой» иммерсии // *Авиакосм. и экол. мед.* 2015. Т. 49. № 3. С. 25–32.
14. Kuznetsova G.D., Gabova A.V., Lazarev I.E. et al. Frequency-temporal structure of human electroencephalogram in the condition of artificial hypogravity: dry immersion model // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2015. V. 49. № 3. P. 25–32.
15. Roberts D.R., Zhu X., Tabesh A. et al. Structural brain changes following long-term 60 head-down tilt bed rest as an analog for spaceflight // *Am. J. Neuroradiol.* 2015. V. 36. P. 2048–2054.
16. Козловская И.Б., Максимов Д.А., Воронков Ю.И. и др. Изменения поясничного отдела позвоночника и острая боль в спине при воздействии 3-суточной «сухой» иммерсии // *Кремлевская медицина. Клин. вестник.* 2015. № 2. С. 87–90.
17. Kozlovskaya I.B., Maximov D.A., Voronkov Yu.I. et al. Changes in the lumbar part of the spinal column and acute pain in the spine under the influence of 3-day «dry» immersion // *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik.* 2015. № 2. P. 87–90.
18. Mohrman D.E., Heller L.J. Cardiovascular Physiology. N.Y., 2018.
19. Ertl A.C., Diedrich A., Biaggioni I. Baroreflex dysfunction induced by microgravity: potential relevance to postflight orthostatic intolerance // *Clin. Auton. Res.* 2000. V. 10. P. 269–277.
20. Ertl A.C., Diedrich A., Biaggioni I. et al. Human muscle sympathetic nerve activity and plasma noradrenaline kinetics in space // *J. Physiol.* 2002. V. 538. P. 321–329.

19. Aeschbach D., Matthews J.R., Postolache T.T. et al. Dynamics of the human eeg during prolonged wakefulness: evidence for frequency-specific circadian and homeostatic influences // *Neurosci. Lett.* 1997. V. 239. P. 121–124.

20. Aeschbach D., Matthews J.R., Postolache T.T. et al. Two circadian rhythms in the human electroencephalogram during wakefulness // *Am. J. Physiol.* 1999. V. 277. № 6. P. 1771–1779.

Поступила 03.05.2023

COMPARISON OF EEG CHANGES AT REST DURING 21-DAY DRY IMMERSION AND 21-DAY HEAD-DOWN BED REST

Ukrainitseva Yu.V.^{1, 2}, Zhurina Yu.D.¹, Lazarev I.E.¹, Tomilovskaya E.S.¹

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Changes in EEG were investigated in two ground-based hypogravity simulation experiments: 21-d dry immersion (DI) and 21-d bed rest (BR).

Ten volunteers participated in DI, and 6 volunteers in BR. EEG was recorded before and on days 5 and 17 of DI and BR. EEG spectral power was analyzed using the fast Fourier transform. EEG spectral power during DI and BR were compared.

Our results showed that some EEG changes during DI and BR were similar. In both simulations, a decrease in theta1 and beta (beta1 in DI and beta2 in BR) spectral power was detected on the 5th day of exposure. However, in DI, the decrease in slow rhythms was more evident than in BR. Not only did theta1 decline, but the power in theta2, delta1, and delta2 bands also decreased. The differences between the two experiments were also seen on the 17th day of exposure. The theta and beta power increased on the 17th day of BR, reaching the baseline level, whereas, on the 17th day of DI, the spectral power of slow rhythms remained reduced.

Key words: dry immersion, head-down bed rest, EEG.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 55–61.

УДК 159.9.072.5

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ ОРГАНИЗМА ЗДОРОВОГО ЧЕЛОВЕКА К МОДЕЛИРУЕМЫМ ФАКТОРАМ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С 21-СУТОЧНОЙ «СУХОЙ» ИММЕРСИЕЙ

Журавлева Т.В., Логинов В.И.

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

E-mail: tita1993@mail.ru

В эксперименте с 21-суточной «сухой» иммерсией, в котором участвовали 8 мужчин в возрасте от 25 до 33 лет, изучались психологические особенности адаптации к моделируемым факторам космического полета. За 14 сут до начала и на 21-е сутки экспериментального воздействия проводилось психологическое тестирование испытуемых. Использовались многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» А.Г. Маклакова и С.В. Чермянина, опросник «Оценка психической активности, интереса, эмоционального тонуса, напряжения и комфортности» Л.А. Курганского и Т.А. Немчина, симптоматический опросник «Самочувствие в экстремальных условиях» А. Волкова и Н.Е. Водопьяновой и ситуационный вариант шкалы «Субъективная витальность» Р. Райана и С. Фредерик в адаптации Л.А. Александровой.

Участники эксперимента с 21-суточной «сухой» иммерсией достаточно эффективно адаптировались к моделируемым условиям, о чем свидетельствовала стабильность их личностного адаптационного потенциала. На заключительном этапе эксперимента у испытуемых выявлены повышение уровня невротизации, дисбаланс в системе вегетативной регуляции, нарушение цикла «сон – бодрствование», психологический дискомфорт и ослабление энергетического потенциала. Обнаруженные изменения психологического состояния свидетельствовали об умеренно выраженной стрессорной реакции на моделируемые условия. Стресс адекватно преодолевался организмом.

Ключевые слова: «сухая» иммерсия, личностный адаптационный потенциал, психическая активность, суммарный уровень невротизации, ситуационная субъективная витальность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 62–67.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-62-67

Особенностями методологии в космической медицине являются максимальный учет резервных возможностей организма, персонифицированный подход к исследованиям, широкое применение дистанционных средств контроля и прогнозирования здоровья человека, оценка донозологических изменений в функционировании организма, а также

профилактика неблагоприятного действия экстремальных факторов среды обитания [1]. Здоровье в космической медицине рассматривается как непрерывный процесс приспособления человека к условиям среды обитания, а мерой здоровья являются адаптационные возможности организма [2]. Только на основе динамической оценки резервов адаптации возможно создание эффективной системы мониторинга самочувствия и работоспособности космонавтов.

Прогнозирование успешности адаптации основывается на понятии адаптированности, рассматривающейся как соответствие личностного адаптационного потенциала требованиям динамично меняющихся условий окружающей среды [3]. Адаптированность соотносится с адекватной самооценкой, позитивной мотивацией деятельности, стрессоустойчивостью, способностью находить оптимальный выход из кризисных ситуаций на основе собственного опыта, физиологических и психологических ресурсов организма [4]. Возможности человека воспользоваться имеющимися внутренними ресурсами определяют, насколько личность способна справиться с жизненными трудностями и ситуациями, носящими субэкстремальный и экстремальный характер. Социально-психологическая адаптированность, креативность, уровень психологического благополучия, а также физическое и психическое здоровье тесно связаны с жизнестойкостью [5]. По мнению Д.А. Леонтьева и Е.И. Рассказовой, жизнестойкость представляет собой один из ключевых параметров способности индивида к сложным формам саморегуляции и одну из основополагающих переменных личностного потенциала. Она определяет уровень способностей человека преодолевать стресс, не нарушая при этом внутренний баланс и не снижая успешность деятельности [6]. Жизнестойкость, высокий уровень стрессоустойчивости и способность быстро адаптироваться к условиям среды обитания особенно важны для представителей экстремальных профессий. И в первую очередь это касается космонавтов, чья трудовая деятельность сопряжена с рисками для их здоровья и жизни.

Всесторонне оценить степень адаптированности человека к действию факторов космического полета возможно в наземных модельных экспериментах, имитирующих различные эффекты гипогравитации. Преимуществами таких экспериментов являются возможность использования более широкого спектра научной аппаратуры и оборудования, отсутствие дефицита времени на проведение исследований, большой объем статистической выборки и возможность в реальном времени контролировать большинство переменных, оказывающих значимое влияние на физическое и психическое здоровье обследуемых. В рамках реализации этих преимуществ для изучения медицинских, психологических, эргономических, технологических и других проблем обеспечения пилотируемой космонавтики специалистами ГНЦ РФ – ИМБП РАН проводится множество экспериментов, воспроизводящих различные эффекты гипогравитации [7].

Практически полное отсутствие опорной нагрузки и схожесть механизмов организации двигательной деятельности на орбитальной космической станции определили выбор «сухой» иммерсии (СИ) в качестве наиболее эффективной модели для отработки биомеханики движений в невесомости [8]. На протяжении более чем полувековой истории пилотируемой космонавтики в экспериментах с «сухой» иммерсией различной продолжительности детально изучалось влияние опорной разгрузки на физиологические системы организма в плане их приспособления к моделируемым условиям. А психологическим проблемам адаптации уделялось не так много внимания. Между тем способность к адаптации является не только индивидуальным, но и личностным свойством [9].

Цель данной работы – оценить психологические особенности адаптации участников эксперимента с 21-суточной СИ к моделируемым факторам космического полета.

Методика

В эксперименте с 21-суточной «сухой» иммерсией (СИ-2019) участвовали 8 прошедших медицинский и психологический отбор мужчин в возрасте от 25 до 33 лет. Протокол эксперимента № 483 утвержден Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН 03.08.2018 г.

На основании подписанного каждым испытуемым Информированного согласия за 14 сут до начала и на 21-е сутки эксперимента им предлагалось пройти письменное психологическое тестирование. Использовались многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» [10], опросник «Оценка психической активации, интереса, эмоционального тонуса, напряжения и комфортности» [11], симптоматический опросник «Самочувствие в экстремальных

условиях» [12] и ситуационный вариант шкалы «Субъективная витальность» [13].

Многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» (МЛО-А) создан А.Г. Маклаковым и С.В. Чермяниным. Он основан на концепции личностного адаптационного потенциала, уровень которого позволяет судить об успешности социально-психологической адаптации личности к экстремальным ситуациям и прогнозировать эффективность профессиональной деятельности специалистов различного профиля. Личностный адаптационный потенциал можно оценить, исследовав нервно-психическую устойчивость, коммуникативные способности и отношение к морально-нравственным нормам, принятым в социуме [9].

Опросник «Оценка психической активации, интереса, эмоционального тонуса, напряжения и комфортности» (САН-М) разработан Л.А. Курганским и Т.А. Немчиным. Он является модификацией теста «Самочувствие, активность, настроение» (САН). Также, как и САН, он построен на принципе полярных профилей С.Е. Osgood [14]. САН-М предназначен для определения психического состояния человека в текущий промежуток времени [15].

Симптоматический опросник «Самочувствие в экстремальных условиях» (СОС) разработан А.В. Волковым и Н.Е. Водопьяновой. Он предназначен для лиц, профессиональная деятельность которых предполагает работу в экстремальных условиях жизнедеятельности. СОС позволяет выявить у обследуемых нервно-психическую неустойчивость и предрасположенность к патологическим стресс-реакциям и невротическим расстройствам [16].

Шкала «Субъективная витальность» (СВС) – адаптированная Л.А. Александровой [13] русскоязычная версия теста The Subjective Vitality Scale (Vt-s) R.M. Ryan и C.M. Frederick [17]. Vt-s основана на теории самодетерминации Е.Л. Deci и R.M. Ryan. В основу данной теории заложены представления авторов о потребностях в автономии, компетентности и связи с социумом как об основных составляющих базовых психологических потребностей человека, удовлетворение которых способствует поддержанию нормального уровня психологического благополучия личности [18]. Лица с высоким уровнем субъективной витальности хорошо справляются со стрессом, более активны и продуктивны, у них меньше психологических проблем. Они более эффективно решают поставленные задачи и легче достигают намеченных целей [19]. С помощью СВС можно оценивать витальность как субъективное ощущение психологического комфорта и переживание человеком обладания жизненной энергией в текущий момент времени [13].

Статистическую обработку данных проводили методами вариационной статистики с применением пакета прикладных программ Statistica for Windows,

Kernel Release, версия 11.0, фирмы StatSoft Inc. (США). Для всех показателей вычисляли медиану (Me), а также нижнюю и верхнюю границы квартильных отрезков (LQr, UQr). Достоверность различий между показателями фонового периода (первичное тестирование) и заключительного этапа «сухой» иммерсии (повторное тестирование) определяли с помощью непараметрического критерия Вилкоксона.

Результаты и обсуждение

Анализ данных начинали с подсчета баллов, набранных испытуемыми по шкале «Достоверность результатов тестирования» многоуровневого личностного опросника «Адаптивность». Участники эксперимента с 21-суточной СИ при первичном и повторном тестировании набрали по данной шкале менее 10 баллов (таблица).

Из этого следует, что полученные результаты достоверны [4].

Баллы, набранные участниками СИ-2019 по всем шкалам МЛО-А при повторном тестировании, статистически значимо не отличались от баллов первичного. В количественном выражении у всех испытуемых баллы шкал «Коммуникативные способности», «Моральная нормативность», «Нервно-психическая устойчивость» и «Личностный адаптационный потенциал» соответствовали 5–7 стэнам (см. табл.). Согласно методическим рекомендациям разработчиков МЛО-А, испытуемые, баллы которых при тестировании соответствуют 5–10 стэнам, имеют высокие уровни эмоциональной устойчивости и коммуникативных способностей. Они достаточно легко приспосабливаются к различным обстоятельствам, быстро реагируют на изменение ситуации, используют активные копинг-стратегии преодоления стресса [20]. Так как личностный адаптационный потенциал участников СИ-2019 оставался неизменным, можно полагать, что в психологическом плане они успешно адаптировались к моделируемым условиям с сохранением нормального состояния здоровья и работоспособности.

По данным опросника САН-М психическая активность, интерес к работе, эмоциональный тонус и комфортность у всех испытуемых соответствовали среднему уровню. Степень выраженности напряжения у них также была средней (см. табл.). На этом основании можно утверждать, что психическое состояние участников СИ-2019 было удовлетворительным и позволяло им достаточно оперативно решать поставленные задачи.

Согласно результатам тестирования с помощью опросника «Самочувствие в экстремальных условиях», баллы шкал «Вегетативная неустойчивость» и «Нарушение сна» у испытуемых на заключительном этапе воздействия были в 2 раза выше исходных.

А баллы шкалы «Суммарный уровень невротизации» превышали фоновые данные в 2,3 раза (см. табл.). Это свидетельствовало о дисфункции вегетативной нервной системы, нарушении цикла «сон – бодрствование» и ослаблении способностей противостоять стрессу у участников СИ-2019. По данным С.А. Скединой, А.А. Ковалевой и М.Г. Потапова, при проводимом на 21-е сутки иммерсионного воздействия комплексном исследовании характеристик активности головного мозга у испытуемых регистрировался подъем уровня постоянного потенциала (УПП). С одной стороны, с помощью данного показателя можно оценивать мозговой кровоток, а с другой – УПП опосредованно отражает адаптационные реакции организма в ответ на действие внешних стрессорных факторов. Функциональная и метаболическая активность мозга возрастают при стрессе любой этиологии, что обусловлено необходимостью срочного запуска адаптационных механизмов, реализуемых вегетативной нервной системой [21]. При проведении у участников эксперимента с 21-суточной СИ ночной полисомнографии было показано, что латентность сна, количество пробуждений и продолжительность периодов бодрствования у них были достоверно увеличены относительно фоновых данных на протяжении всего эксперимента [22]. О нарушении цикла «сон – бодрствование» можно косвенно судить и по статистически значимому снижению концентрации магния в крови испытуемых на заключительном этапе СИ [23]. Как известно, магний является одним из ключевых макроэлементов, участвующих в регуляции цикла «сон – бодрствование» посредством ингибирования NMDA-рецепторов гиппокампа и снижения нервной возбудимости практически всех отделов головного мозга [24].

Согласно результатам тестирования с помощью шкалы «Ситуационная субъективная витальность», баллы участников СИ-2019 при повторном тестировании были достоверно ниже баллов первичного на 9,2 % (см. табл.). Это отражало наличие у испытуемых психологического дискомфорта и ослабление их энергетического потенциала к окончанию экспериментального воздействия. С одной стороны, снижение уровня психологического благополучия у участников СИ-2019 на заключительном этапе эксперимента могло быть обусловлено стрессом, а с другой – ухудшением их физического состояния. В эксперименте с 3-суточной СИ, в котором участвовали 12 человек, была выявлена положительная корреляция между интенсивностью поясничной боли и концентрацией кортизола в моче испытуемых, собранной в течение суток ($r = 0,64$; $p = 0,020$). Было показано, что уровень общего дискомфорта у участников эксперимента с 3-суточной СИ варьировал в интервале 30–45 баллов по 100-балльной оценочной шкале. Это свидетельствовало о стресс-реакции на моделируемые условия [25].

**Результаты первичного и повторного психологических тестирований
участников эксперимента с 21-суточной СИ**

Шкалы методик		Сроки тестирования	
		Me, LQr – UQr; n = 8	
		-14-е сутки	21-е сутки
МЛО-А	Достоверность результатов тестирования	2,5 (2,0–4,0)	3,0 (2,5–5,0)
	Коммуникативные особенности	7,5 (6,0–9,0)	8,5 (6,5–11,0)
	Моральная нормативность	6,0 (4,0–11,0)	7,5 (5,0–9,5)
	Нервно-психическая устойчивость	12,5 (6,5–14,0)	11,5 (6,5–15,5)
	Личностный адаптивный потенциал	23,5 (18,0–32,5)	23,5 (15,5–31,5)
САН-М	Психическая активность	5,5 (4,0–11,0)	6,5 (5,0–9,0)
	Интерес	6,0 (4,0–7,0)	8,5 (5,0–9,5)
	Эмоциональный тонус	5,5 (3,5–6,0)	6,0 (4,0–7,0)
	Напряжение	10,5 (9,0–14,0)	11,5 (11,0–12,5)
	Комфортность	6,5 (5,0–9,5)	7,5 (6,5–9,5)
СОС	Истощение психо-энергетических ресурсов	1,0 (1,0–1,5)	1,0 (1,0–2,0)
	Нарушение воли	1,0 (0,0–1,0)	1,0 (1,0–1,5)
	Эмоциональная неустойчивость	1,0 (0,5–1,5)	1,0 (1,0–1,5)
	Вегетативная неустойчивость	1,0 (1,0–1,5)	2,0 (1,0–3,5)*
	Нарушение сна	1,0 (1,0–1,5)	2,0 (1,5–2,5)*
	Тревога и страхи	1,0 (1,0–2,0)	1,0 (1,0–1,5)
	Дезадаптация	1,5 (1,0–2,0)	1,0 (1,0–2,0)
	Суммарный уровень невротизации	1,5 (0,0–3,5)	3,5 (1,5–5,5)*
СВС	Субъективная витальность ситуационная	36,5 (34,0–39,5)	33,5 (30,5–35,5)*

Примечание. * – достоверность различий с фоновыми величинами по критерию Вилкоксона, $p < 0,05$.

В целом обнаруженные у участников эксперимента с 21-суточной СИ изменения психологических показателей свидетельствовали о наличии у них умеренно выраженной стрессорной реакции.

Выводы

1. Участники эксперимента с 21-суточной СИ достаточно эффективно адаптировались к моделируемым условиям, их актуальное психическое состояние было удовлетворительным и позволяло им оперативно решать поставленные задачи.

2. На заключительном этапе эксперимента у испытуемых наблюдались признаки умеренно

выраженной стресс-реакции, проявляющиеся в дисфункции вегетативной нервной системы, нарушении цикла «сон – бодрствование», повышении уровня невротизации, психологическом дискомфорте и ослаблении энергетического потенциала.

3. Стресс у испытуемых адекватно преодолевался организмом, его проявления не требовали психотерапевтической и медикаментозной коррекции.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН № 63.2.

Список литературы

1. Орлов О.И., Куссмауль А.Р., Белаковский М.С. Роль космической медицины в здравоохранении на Земле // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 2. С. 26–38.
- Orlov O.I., Kussmaul' A.R., Belakovskiy M.S. The role of space medicine in public health care on the Earth // Vozdushno-kosmicheskaya sfera. 2020. № 2. P. 26–38.
2. Баранов В.М., Баевский Р.М., Берсенева А.П., Михайлов В.М. Оценка адаптационных возможностей организма и задачи повышения эффективности здравоохранения // Экология человека. 2004. № 6. С. 25–29.
- Baranov V.M., Baevskiy R.M., Berseneva A.P., Mikhaylov V.M. Evaluation of adaptive abilities of an organism and tasks of healthcare effectiveness increase // Ekologiya cheloveka. 2004. № 6. P. 25–29.
3. Вассерман Л.И., Исаева Е.Р., Новожилова М.Ю., Щелкова О.Ю. Психологические механизмы совладания со стрессом профессиональной деятельности (на модели лиц «опасных» профессий) // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Серия 12. Вып. 4. С. 364–372.
- Wasserman L.I., Isaeva E.R., Novozhilova M.Yu., Shelkova O.Yu. Psychological mechanisms of coping with stress professional activity (on the model of individuals with «dangerous» professions) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. 2008. Seriya 12. № 4. P. 364–372.
4. Zhuravleva T.V., Nichiporuk I.A., Bubeev Yu.A. et al. Psychological and metabolic changes in the adaption of the Sirius 17-day experiment participants to the conditions of isolation in a confined environment // Human Physiol. 2019. V. 45. № 7. P. 740–746.
5. Вербина Г.Г. Жизнестойкость человека как личностный ресурс достижения высокого уровня физического и психического здоровья // Клиническая и медицинская психология: исследования, обучение, практика. Электронный научный журнал. 2017. Т. 5. № 4 (18) [Электронный ресурс]. URL: <http://medpsy.ru/climp> (дата обращения: 01.11.2022).
- Verbina G.G. Hardiness as a personal resource for achieving a high level of physical and mental health // Klinicheskaya i meditsinskaya psikhologiya: issledovaniya, obuchenie, praktika. Elektronnyi nauchnyi zhurnal. 2017. V. 5. № 4 (18) [Elektronnyi resurs]. URL: <http://medpsy.ru/climp> (application date: 01.11.2022).
6. Леонтьев Д.А., Рассказова Е.И. Тест жизнестойкости. М., 2006.
- Leont'ev D.A., Rasskazova E.I. Hardiness survey. Moscow, 2006.
7. Гушин В.И., Виноходова А.Г., Комиссарова Д.Г. и др. Эксперименты с изоляцией: прошлое, настоящее, будущее // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 4. С. 5–16.
- Gushchin V.I., Vinokhodova A.G., Komissarova D.V. et al. Experiments with isolation: the past, present and future // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 4. P. 5–16.
8. Томиловская Е.С., Рукавишников И.В., Амирова Л.Е. и др. 21-суточная «сухая» иммерсия: особенности проведения и основные итоги // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 5–14.
- Tomilovskaya E.S., Rukavishnikov I.V., Amirova L.E. et al. 21-day dry immersion: design and primary results // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2020. V. 54. № 4. P. 5–14.
9. Маклаков А.Г., Чермянин С.В. Психологическое прогнозирование в экстремальных условиях деятельности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. 2009. Сер. 12. Вып. 4. С. 142–148.
- Maklakov A.G., Chermnyanin S.V. Psychological forecasting in extreme conditions of activity // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2009. Seriya 12. № 4. P. 142–148.
10. Никифоров Г.С., Дмитриева М.А., Снетков В.М. Практикум по психологии менеджмента и профессиональной деятельности. СПб., 2003.
- Nikiforov G.S., Dmitrieva M.A., Snetkov V.M. A workshop on the psychology of management and professional activity. St.-Petersburg, 2003.
11. Прохоров А.О. Методики диагностики и измерения психических состояний личности. М., 2004.
- Prokhorov A.O. Methods of diagnostics and measurement of mental states of personality. Moscow, 2004.
12. Водопьянова Н.Е. Психодиагностика стресса. СПб., 2009.
- Vodopyanova N.E. Psychodiagnostics of stress. St.-Petersburg, 2009.
13. Александрова Л.А. Субъективная витальность как предмет исследования // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2014. Т. 11. № 1. С. 133–163.
- Aleksandrova L.A. Subjective vitality as a research object // Psikhologiya. Zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki. 2014. V. 11. № 1. P. 133–163.
14. Osgood C.E. Method and theory in experimental psychology. N.Y., 1956.
15. Барканова О.В. Методики диагностики эмоциональной сферы: психологический практикум. Красноярск, 2009.
- Barkanova O.V. Methods of diagnostics of the emotional sphere: a psychological workshop. Krasnoyarsk, 2009.
16. Козлова Н.В., Богомаз С.А., Левицкая Т.Е., Мещерякова Э.И. Групповая и индивидуальная психодиагностика ресурсов психологической безопасности личности в условиях опасного производства // Медицинская психология в России: электронный научный журнал. 2018. Т. 10. № 3. С. 11–27. URL: http://mprj.ru/archiv_global/2018_3_50/nomer06.pdf.
- Kozlova N.V., Bogomaz S.A., Levitskaya T.E., Meshcheryakova E.I. Group and individual psychodiagnostics of psychological safety resources in specialists in explosion-and-fire-hazardous chemical workplaces // Meditsinskaya psikhologiya v Rossii: elektronnyi nauchnyi zhurnal. 2018. V. 10. № 3. P. 11–27. URL: http://mprj.ru/archiv_global/2018_3_50/nomer06.pdf.
17. Ryan R.M., Frederick C.M. On energy, personality and health: Subjective vitality as a dynamic reflection of

well-being // J. of Res. in Personality. 1997. V. 65. № 3. P. 529–565.

18. Ryan R.M., Deci E.L. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being // Am. Psychologist. 2000. V. 55. P. 68–78.

19. Adil A., Kanwal A., Yasin G., Ameer S. Ego depletion sensitivity as the mediator between avoidance temperaments and subjective vitality // Polish Psychol. Bull. 2021. V. 52. № 2. P. 188–196.

20. Берг Т.Н. Нервно-психическая неустойчивость и способы ее выявления. Владивосток, 2005.

Berg T.N. Mental instability and methods of its detection. Vladivostok, 2005.

21. Скедина С.А., Ковалёва А.А., Потапов М.Г. Метаболическая и электрическая активности головного мозга в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 64–72.

Skedina S.A., Kovaleva A.A., Potapov M.G. Metabolic and electrical activities of the brain during 21-day dry immersion // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2020. V. 54. № 4. P. 64–72.

22. Bersenev E.Yu., Ukraintceva Yu.V., Kovrov G.V. et al. Sleep in 21-day dry immersion. Are cardiovascular adjustments rapid eye movement sleep-dependent? // Front. in Physiol. 2021. V. 12. Art. 749773. P. 1–10.

23. Маркин А.А., Журавлева О.А., Кузичкин Д.С. и др. Исследование метаболических реакций у испытуемых в динамике 21-суточной «сухой» иммерсии // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 88–92.

Markin A.A., Zhuravleva O.A., Kuzichkin D.S. et al. Investigation of metabolic reactions in human subjects in dynamics of 21-day dry immersion // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2020. V. 54. № 4. P. 88–92.

24. Журавлева Т.В., Ничипорук И.А., Бубеев Ю.А. и др. Психологические, нейрогормональные и метаболические особенности адаптации участников эксперимента Sirius-18/19 к условиям 120-суточной изоляции в гермообъекте // Авиакосм. и экол. мед. 2021. Т. 55. № 2. С. 48–55.

Zhuravleva T.V., Nichiporuk I.A., Bubeev Yu.A. et al. Psychological, neurohormonal and metabolic characteristics of the Sirius-18/19 members' adaptation to the 120-day isolation in a pressurized module // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2021. V. 55. № 2. P. 48–55.

25. De Abreu S., Amirova L., Murphy R. et al. Multi-system deconditioning in 3-day dry immersion without daily raise // Front. in Physiol. 2017. V. 8. Art. 799. P. 1–16.

Поступила 14.10.2023

PSYCHOLOGICAL ASPECTS OF ADAPTATION OF THE HEALTHY HUMAN ORGANISM TO SIMULATED SPACEFLIGHT FACTORS IN AN EXPERIMENT WITH 21-DAY DRY IMMERSION

Zhuravleva T.V., Loguinov V.I.

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The 21-d dry immersion study with participation of 8 male volunteers at the age of 25 to 33 years included investigations of the psychological aspects of adaptation to simulated spaceflight factors. Psychological testing 14 days prior to DI and on day 21 of the study was performed using the multilevel adaptivity inventory (A.G. Maklakova and S.V. Chermianina), the inventory of mental activity, interests, affective tone, strain and comfort (L.A. Kurgansky and T.A. Nemchina), well-being in extreme conditions inventory (A. Volkova and N.E. Vodopianova) and situation-adaptable subjective vitality scale (R. Rayan and S. Frederick, apesialized by L.A. Aleksandrova).

Participants in the study adapted successfully to the conditions as could be deduced from stability of their personal adaptation potential. At the end of the study the participants were noted to be more neurotic, demonstrated symptoms of autonomic regulation imbalance, disorders in the sleep wakefulness cycles, psychological discomfort and reduction of the energy potential. These changes witnessed to a moderate stress reaction to the DI conditions.

Key words: dry immersion, personal adaptation potential, psychic activity, total neurotization level, situational subjective vitality.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 62–67.

УДК 612.821

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХИЧЕСКОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ГРУППОВОЙ ДИНАМИКИ В АВТОНОМНЫХ УСЛОВИЯХ ЗИМОВКИ НА СТАНЦИИ «ВОСТОК»

Кузнецова П.Г., Коротаев К.С., Лебедева С.А., Швед Д.М., Савинкина А.О.,
Гущин В.И., **Ильин Е.А.**

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

E-mail: kuznetsovapg@imbp.ru

В статье представлены исследования психической работоспособности и групповой динамики в автономных условиях зимовки на станции «Восток». В рамках Российской антарктической экспедиции (РАЭ-66) 8 зимовщиков проходили психофизиологическое тестирование 7 раз за период командировки. Для диагностики психической работоспособности применялась батарея когнитивных тестов «Мастер-тест», для изучения групповой динамики – социометрия и методика диагностики целевого и ценностного единства коллектива. Психофизиологическое состояние оценивалось на основе недельных данных актиграфии и регистрации ЧСС, а также с использованием опросных методов.

После периода полярного дня и наступления осени на строение обследуемых первоначально ухудшалось (осень и зима), после чего происходило снижение точности сенсомоторной реакции (зима) и надежности ответов в тесте на простой математический счет (зима и весна). Точность кратковременной зрительной памяти в этот период, напротив, улучшалась (зима и весна). Двигательная активность снижалась в течение первой половины экспедиции, постепенно увеличиваясь, начиная с полярной ночи. Несмотря на нормальную продолжительность сна от 7 до 8,5 ч, субъективная оценка качества сна изменялась на протяжении зимовки и была связана с уровнем физической активности, вариабельностью ритма сердца (стрессом) и пульсоксигенацией. Уровень насыщения крови кислородом был снижен на всем протяжении пребывания на станции «Восток», по сравнению с измерениями на корабле. Сплоченность группы находилась на высоком уровне, незначительно снижаясь к третьей четверти зимовки, и возвращаясь к высоким показателям к концу пребывания в Антарктиде. Социометрический статус полярников был тем выше, чем меньше они отмечали у себя негативные эмоции.

Ключевые слова: психофизиология, психическая работоспособность, антарктическая экспедиция, аналоговый эксперимент, экстремальные условия, автономный экипаж, сплоченность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 68–79.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-68-79

Условия жизнедеятельности зимовщиков в Антарктике традиционно считаются одним из аналогов космического полета [1]. В комплекс этих условий входят неблагоприятные физические факторы (низкие температуры и атмосферное давление, гипоксия, геомагнитная обстановка, солнечная активность и др.), удаленность, сенсорная и социальная депривация, ограниченность пространства проживания, скученность, монотония, измененный цикл «сон – бодрствование», автономные условия существования. Было показано, что в аналоговых экспериментах, проводящихся в условиях, представляющих реальную опасность для здоровья обследуемых, ярче проявляются стресс-реакции и адаптивные стратегии в сравнении с изоляционными экспериментами в полностью контролируемых условиях [2].

Первые отечественные аналоговые эксперименты были проведены в период с 1966 по 1972 г. сотрудниками ИМБП во время 6 годовых зимовок на станции «Восток» в Антарктиде. Станция расположена на расстоянии 1253 км от Южного географического полюса Земли на ледниковом куполе на высоте 3488 м в условиях среднегодовой температуры -55,4 °С [3]. Неблагоприятными факторами зимовки являются изоляция, длительная автономность существования и невозможность оказания помощи извне в течение 9 мес в год, монотонность, гипокинезия, измененный световой режим дня и ночи (полярный день и полярная ночь по 4 мес), постоянно действующая гипоксия, небольшой по численности коллектив (12–16 человек). Проведенные исследования показали, что за время годовой зимовки на станции «Восток» не происходит полной адаптации организма к перечисленным экстремальным условиям. При этом адаптация может сопровождаться возникновением психосоматических заболеваний и невротических расстройств (гипертоническая и язвенные болезни, дерматит, депрессивный синдром, невротические расстройства). Полученные результаты были учтены при медицинском обосновании возможности длительных (до года и более) полетов человека в космос [4].

Многочисленные литературные обзоры посвящены медицинским и психологическим последствиям зимовок, которые включают утомление, желудочно-кишечные расстройства, головные боли, нарушения сна, снижение когнитивных функций, негативные эмоции и межличностные конфликты [5–7]. Нарастание депрессивной симптоматики, нарушений сна, когнитивных ошибок, конфликтной напряженности в группе и других негативных феноменов получило название «зимовочный синдром» [8]. Кроме того, у лиц, пребывающих в условиях заполярья, были выявлены существенные сезонные (в том числе связанные со сменой полярного дня и полярной ночи) колебания гормонального фона, когнитивных функций и настроения [9, 10]. В исследованиях на антарктических станциях было выявлено ухудшение качества сна зимовщиков, которое связывается с когнитивными, психологическими, физиологическими и иммунными нарушениями [11]. У обследуемых наблюдалось снижение скорости сенсомоторных реакций и нарастание утомления в ходе зимовки, вызванные повышением латенции сна и нарушениями дыхания во сне, обусловленными гипоксией [12]. В исследованиях в арктических регионах было установлено, что в периоды полярного дня и полярной ночи происходят существенные сдвиги фаз сна и развивается бессонница, причем депрессивная симптоматика в период полярной ночи усиливала данные изменения [13].

В ходе длительных зимовок, в дополнение к сезонным изменениям, были выявлены и другие феномены, из которых наиболее детально описан феномен «третьей четверти» (или середины экспедиции): снижение настроения и качества социальных взаимодействий (с ростом социальной напряженности) после «экватора» зимовки [14, 15]. Однако личностные особенности членов групп, их сплоченность, стили руководства и факторы окружающей среды существенно влияют на возникновение и сроки изменений в настроении и социальной динамике [16, 17].

Комплексные исследования когнитивных и операторских функций на зарубежных полярных станциях показали, что такие факторы, как длительная изоляция в ограниченном объеме и гипоксия, оказывают существенное негативное влияние на качество операторской деятельности, сенсомоторные функции и внимание [18]. Применение профилактических мер (включая регулярные тренировки и физические нагрузки) позволяет предотвратить нарушение когнитивных функций в течение зимовки [19]. Врачом 66-й экспедиции на станции «Восток» отмечалась потребность полярников в физических нагрузках, возможность которых, особенно в полярную ночь, в нынешней конфигурации станции ограничена. Однако данные об изменениях когнитивных функций в антарктических условиях достаточно

противоречивы и имеют выраженную зависимость от конкретных условий зимовки, контингента и предъявляемых тестовых методик [20].

Еще одним направлением психологических исследований является оценка групповой динамики, единства ценностных ориентаций и структуры экипажа полярников. Динамика межличностных процессов в полярных регионах традиционно рассматривается исследователями как аналог таковой в перспективных космических миссиях [21]. Как показывают исследования в данной области, условия полярной зимовки провоцируют повышение напряженности во взаимоотношениях, появление конфликтных ситуаций [8, 22]. Проблемы групповой сплоченности оказывают значительное влияние на индивидуальное психофизиологическое состояние и работоспособность, могут приводить к разобщенности, разделению экипажа на подгруппы. Групповые процессы и феномены, в свою очередь, являются одним из основных психологических факторов зимовки, оказывая существенное влияние на адаптацию отдельных участников полярной экспедиции к ее условиям [23]. Так, социальная поддержка может быть существенным подспорьем в совладании со стрессогенными ситуациями [24]. Однако нередко участники экспедиций в экстремальных условиях старались не полагаться на поддержку своих товарищей по команде, чтобы не быть обузой для людей, подвергающихся тем же стрессорам [25].

Следует отметить, что в полярных исследованиях были выявлены многочисленные взаимосвязи между биологическими факторами, циркадианными ритмами, нейробиологическими процессами, когнитивными функциями, деятельностью, индивидуальным поведением и групповой динамикой в экстремальных условиях [26]. Исходя из этого, необходим интегральный, междисциплинарный подход к исследованиям, подразумевающий использование комплексного набора физиологических и психологических методов.

Цель представленной работы – исследование психической работоспособности и групповой динамики в автономных условиях зимовки на станции «Восток».

Были поставлены задачи:

- получение данных о суточной двигательной активности, состоянии когнитивных функций, качестве сна и групповой динамике экипажа;
- оценка влияния различных периодов полярной экспедиции на психофизиологическое состояние изолированного экипажа.

Основная гипотеза исследования заключается в том, что условия зимовки на антарктической станции оказывают значимое негативное влияние на настроение, качество сна и когнитивную работоспособность обследуемых.

Методика

На момент проведения 66-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ), проходившей с ноября 2020 г. по март 2022 г., коммуникация исследователей с полярниками проходила посредством электронных сообщений. Пересылка даже небольших файлов занимала значительное время радиста. Общение с родными и близкими осуществлялось через мессенджеры 2 ч в день, когда на станции был доступен Wi-Fi. Бытовые условия на станции можно считать непростыми: ограничены варианты питания, влажность воздуха и содержание кислорода в воздухе очень низкие, отсутствует естественное освещение и т. д.

В исследовании приняли участие 8 из 10 членов 66-й зимовочной РАЭ на станции «Восток» – мужчины в возрасте от 35 до 66 лет (среднее – 53 ± 12 лет). Каждому участнику экспедиции был присвоен код (от В-1 до В-10). Среди обследуемых были механики, метеорологи, повар, врач, начальник станции. Повседневная активность каждого из участников зимовки зависела от его профессиональных обязанностей. К примеру, 4 участника исследования (В-3, В-4, В-6, В-7) работали посменно, что периодически нарушало их график сна.

Тестирование проводилось врачом станции «Восток», который был предварительно обучен всем психодиагностическим и психофизиологическим методикам и затем самостоятельно реализовывал исследование в ходе экспедиции при удаленной информационной поддержке сотрудников ИМБП. В связи с ограничениями оборудования, повседневной и внеплановой рабочей нагрузкой участников экспедиции врач проводил исследования в свободное время экипажа. Каждый период тестирования (срез) занимал 2–3 нед. Тестирование проводилось 7 раз за время экспедиции:

1. На корабле, за месяц до прибытия на станцию «Восток» (2–3-я неделя после начала экспедиции), начало лета в Южном полушарии.
2. На ст. «Восток», сразу после завершения полярного дня (ПД) (15–16-я неделя), конец лета – начало осени.
3. На ст. «Восток», при чередовании дня и ночи (20–22-я неделя), осень.
4. На ст. «Восток», во время полярной ночи (ПН) (31–33-я неделя), зима.
5. На ст. «Восток», при чередовании дня и ночи (45–47-я неделя), весна.
6. На ст. «Восток», во время полярного дня, при подготовке к завершению зимовки на станции (55–57-я неделя), начало лета.
7. На корабле, через 3 мес после отбытия со ст. «Восток» (70–72-я неделя), начало весны в Северном полушарии.

В 7-м тестировании приняло участие только 5 из 8 обследуемых, что было связано с различиями в графиках возвращения из экспедиции.

Психическая работоспособность операторов оценивалась с использованием компьютерной батареи когнитивных тестов «Мастер-тест» [27]. В данную программу включены тесты для оценки кратковременной памяти, реакции на движущийся объект (РДО), самооценки настроения.

Исследование двигательной активности проводилось с помощью актиграфов Garmin Vivosmart 4. Использовалось 4 актиграфа, которые члены экипажа поочередно носили в течение недели в каждый из периодов исследования. Выбранная модель актиграфов позволила сохранять результаты исследования без использования специального программного обеспечения и подключения к Интернету. Благодаря этому нами впервые были получены объективные данные о повседневной двигательной активности и длительности сна участников полярной экспедиции. Анализ данных был проведен с помощью сайта Garmin Connect [28]: нами были получены данные о длительности сна и ночных пробуждениях, количестве шагов, пройденных в день, среднем уровне насыщенности крови кислородом во время ночного сна (немедицинский показатель), среднем уровне стресса за день (рассчитывается на основе вариабельности сердечного ритма).

Для сравнения этих данных с субъективной оценкой полярниками качества сна использовался Лидский опросник качества сна. В нем обследуемые оценивали качество (спокойствие) сна, длительность и трудность периодов засыпания и пробуждения. Опросник заполнялся утром, 2 сут подряд в течение каждого периода ношения актиграфов.

Для оценки групповой динамики использовался опросник «Социометрия» [29], в рамках которого каждому участнику исследования предлагалось выбрать 3 членов экспедиции, с которыми они бы предпочли: 1) продолжить работу в следующей экспедиции; 2) провести совместный отпуск. Для оценки групповой сплоченности были использованы тест-опросники целевого единства (1) и предметно-ценностного единства группы по положительным (2) и отрицательным (3) качествам (ЦОЕ) [30]. Для оценки степени совпадения ценностей и целей для каждой пары обследуемых считался коэффициент корреляции Спирмена. Уровень групповой сплоченности рассчитывался как средний в группе коэффициент корреляции по каждому из 3 критериев.

Статистический анализ данных выполнен с использованием методов описательной статистики, критерия Манна – Уитни и корреляционного анализа Спирмена.

Для интерпретации данных также использовались заметки врача экспедиции. Так, по данным врача, в конце декабря 2021 г. весь экипаж переболел COVID-19 в достаточно легкой форме. Тем не менее недавно перенесенная болезнь могла повлиять на

результаты последнего тестирования. Часть результатов тестирования передавалась исследователям сразу, часть была получена только после завершения экспедиции вместе с оборудованием. В связи с этим только после завершения экспедиции было обнаружено, что часть данных актиграфии при внешней сохранности файлов не поддается анализу. Другой особенностью данного исследования являлась относительно низкая мотивация обследуемых на выполнение научной программы.

Все участники исследования подписали добровольное Информированное согласие. Исследование было одобрено Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 556 от 8 октября 2020 г.).

Результаты и обсуждение

Когнитивная работоспособность и настроение

Данные когнитивного теста «Мастер-тест» позволили оценить периоды экспедиции, в которых показатели когнитивной работоспособности и сенсомоторной точности полярников улучшались или снижались. При том, что не было выявлено статистически значимых различий в результатах тестов за разные периоды командировки, мы считаем важным описать наблюдавшиеся тенденции.

Во время 1-го тестирования происходило обучение методикам, что в среднем по группе отражалось в наибольшем количестве ошибок по большинству тестов (рис. 1, 2) и максимальном времени выполнения задач. При 2-м и 3-м тестировании обследуемые уменьшили количество ошибок в тестах РДО и при решении простых математических уравнений. В середине полярной ночи (период зимнего солнцестояния, 4-е тестирование) обследуемые совершали наибольшее за период зимовки количество ошибок в тестах на сенсомоторную координацию (см. рис. 1). В это же время и в период весеннего чередования дня и ночи (4-е и 5-е тестирования) обследуемые демонстрировали тенденции к более медленному и менее успешному решению тестов на простой математический счет (см. рис. 2). Тем не менее в период с начала полярной ночи до завершения зимовки было отмечено наименьшее за всю экспедицию количество ошибок в задачах на кратковременную зрительную память, особенно это было выражено при решении сложных

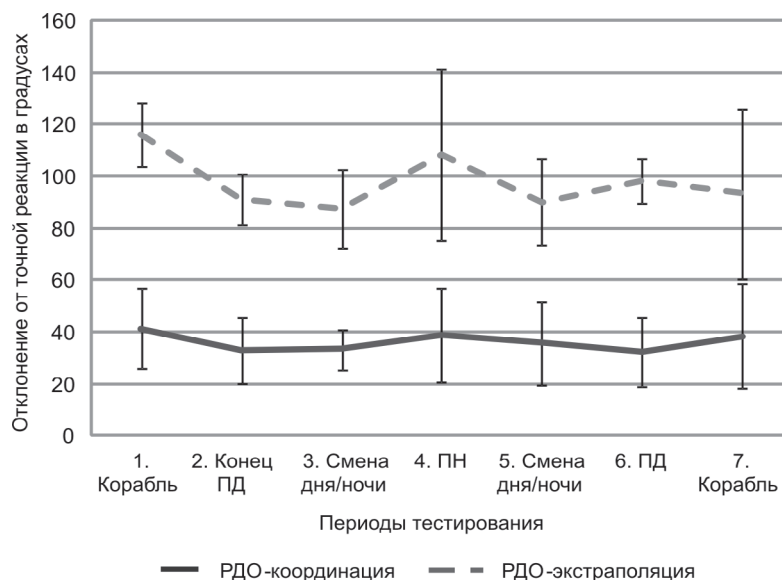


Рис. 1. Динамика точности сенсомоторных ответов в тестах реакции на движущийся объект (координация и экстраполяция).

Приведены средние данные для всех обследуемых. Большие значения на графике соответствуют меньшей точности выполнения теста.

Здесь и на рис. 2–5: $n = 8$ для тестирований 1–6, $n = 5$ для 7-го тестирования. ПД – полярный день; ПН – полярная ночь

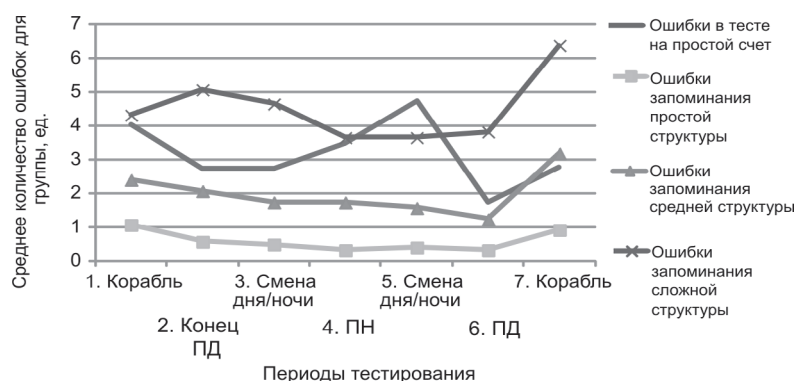


Рис. 2. Динамика количества ошибок, совершенных при решении простых математических уравнений и выполнении тестов на кратковременную зрительную память

задач (см. рис. 2). На пути домой предположительно произошла потеря мотивации к выполнению предложенных тестов, что выражалось в повышении количества ошибок во всех тестах.

Результаты самооценки эмоционального состояния экипажа приведены на рис. 3. В среднем экипаж отмечал большую выраженность положительных состояний: Активности, Спокойствия, Радости и Внимательности, по сравнению с негативными. Некоторое уменьшение чувства Радости и Спокойствия наблюдалось в ходе осеннего чередования дня и ночи и сопровождалось ростом

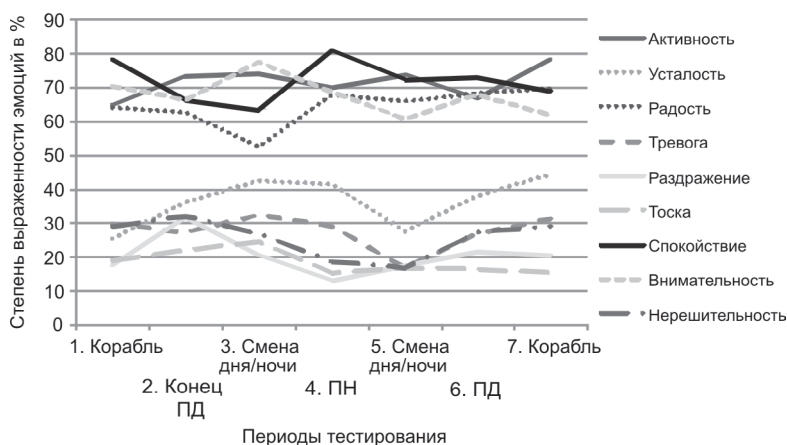


Рис. 3. Динамика эмоционального состояния экипажа в ходе экспедиции.

Приведены средние данные для всех обследуемых

Усталости и Тревоги (3-е тестирование). Степень переживания этих негативных качеств уменьшилась уже после завершения полярной ночи (5-е тестирование).

Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что при окончании первого периода полярного дня и наступления осени первоначально ухудшалось настроение обследуемых (3-й и 4-й срезы), после чего происходило снижение точности сенсомоторной реакции (4-й срез) и надежности ответов в тесте на простой математический счет (4-й и 5-й срезы). Точность выполнения задач на кратковременную зрительную память в этот период, напротив, улучшалась (4-й и 5-й срезы).

Качество сна, уровень стресса и гипоксия

Каждый период регистрации актиграфии занимал от 7 до 9 сут. Результаты исследования приведены в таблице. По техническим причинам для анализа оказалась доступна только часть данных актиграфии (48 % за весь период, отсутствуют данные 5-го среза).

Обследуемые В-3, В-4, В-6 и В-7 в соответствии со своими должностными обязанностями несли ночные дежурства. Поэтому у В-3 в нескольких периодах исследования был зафиксирован 4–5-часовой сон. Для остальных обследуемых была характерна нормальная продолжительность сна в диапазоне от 7 до 8,5 ч.

Уровень пульсоксигенации (SpO_2) заметно отличался при исследованиях на корабле (1-е и 7-е тестирования, в среднем $91,9 \pm 2,6 \%$) и во время зимовки на станции «Восток» (2–6-е тестирование, $83,0 \pm 1,6 \%$) ($p < 0,001$). Это, как можно предположить, связано с расположением станции «Восток» в высокогорье. Врач экипажа описывал сложности с адаптацией к гипоксии, испытываемые многими зимовщиками, – высокая утомляемость, слабость, головные боли.

Высокий уровень стресса был выявлен за весь период наблюдений только единожды – для обследуемого В-1 во время полярной ночи. Кроме того, обследуемый В-3, вероятно, испытывал психофизиологический стресс во время адаптации к условиям высокогорья (в конце 1-го месяца на станции, 2-й период тестирования).

Таблица

Двигательная активность и качество сна обследуемых в разные периоды зимовки

Код участника	Корабль	Конец полярного дня	Чередование дня и ночи	Середина полярной ночи	Завершение зимовки	Корабль	Среднее значение за экспедицию	Среднее за зимовку на ст. «Восток»
	Средняя длительность периода сна							
В-1	7:07:52	7:15:40	7:23:45	8:41:22	7:00:09	7:08:40	7:26:15	7:35:14
В-2					8:11:37		8:11:37	8:11:37
В-3*	7:21:00	4:35:00	4:11:40	5:01:34	6:19:52	6:11:26	5:36:45	5:02:02
В-4*					7:00:09		7:00:09	7:00:09
В-5		8:36:30			7:33:43	8:16:00	8:08:44	8:05:06
В-6*	8:27:50				7:24:00	9:38:51	8:30:14	7:24:00
В-7*	7:33:12	7:06:40	7:32:23	7:21:50	8:07:48	8:04:08	7:37:40	7:32:10
В-8					7:42:15		7:42:15	7:42:15

продолжение таблицы

Код участника	Корабль	Конец полярного дня	Чередование дня и ночи	Середина полярной ночи	Завершение зимовки	Корабль	Среднее значение за экспедицию	Среднее за зимовку на ст. «Восток»
	Средняя длительность ночных пробуждений							
В-1	0:11:37	0:06:30	0:06:22	0:05:30	0:02:15	0:07:40	0:06:39	0:05:09
В-2					0:17:37		0:17:37	0:17:37
В-3*	0:17:26	0:00:00	0:05:50	0:22:26	0:15:07	0:08:51	0:11:37	0:10:51
В-4*					0:10:17		0:10:17	0:10:17
В-5		0:20:20			0:07:34	0:09:52	0:12:36	0:13:57
В-6*	0:10:10				0:15:00	0:16:34	0:13:55	0:15:00
В-7*	0:14:36	0:12:20	0:11:23	0:10:20	0:15:24	0:26:15	0:15:03	0:12:22
В-8					0:17:00		0:17:00	0:17:00
	Среднее значение SpO ₂ во время ночного сна							
В-1	89,5 %	79,8 %	84,7 %	81,7 %	82,9 %	91,9 %	85,1 %	82,3 %
В-2					83,6 %		83,6 %	83,6 %
В-3*	88,8 %		84,0 %	81,4 %	80,0 %	91,1 %	85,1 %	81,8 %
В-4*					82,5 %		82,5 %	82,5 %
В-5		82,3 %			82,6 %	94,1 %	86,3 %	82,5 %
В-6*	88,7 %				84,2 %	92,6 %	88,5 %	84,2 %
В-7*	96,0 %	83,8 %	83,3 %	84,5 %	84,8 %	94,6 %	87,8 %	84,1 %
В-8					85,3 %		85,3 %	85,3 %
	Уровень стресса							
В-1	56	69	62	79	65	42	62,17	68,75
В-2					41		41	41
В-3*	32	72	45	56	45	40	48,33	54,5
В-4*					33		33	33
В-5		19			19	21	19,67	19
В-6*	15				28	16	19,67	28
В-7*	50	27	29	36	33	35	35	31,25
В-8					28		28	28
	Среднее количество пройденных шагов в день							
В-1	4585	3912	1767	2339	2268	5491	3393,62	2571,5
В-2					11081		11081	11081
В-3*	6089	5387	4659	4108	4189	7625	5342,83	4585,75
В-4*					3295		3295	3295
В-5	11031	6916			4637	4769	6838,25	4637
В-6*	13713				8120	12040	11291	8120
В-7*		10002	6852	6658	7897	8411	7964	7852,25
В-8					6287		6287	6287

Примечание. * – обследуемые, несущие ночные дежурства.

Двигательная активность зимовщиков снижалась в течение первой трети экспедиции и оставалась практически на неизменном уровне до конца зимовки. Часть обследуемых (например, В-2 и В-10) в течение зимовки специально выходили на длительные прогулки вокруг станции, чтобы поддерживать физическую форму.

При сравнении результатов актиграфии с данными субъективной оценки качества сна было выявлено несколько значимых связей. Корреляционный анализ (по критерию Спирмана) показал наличие связей ($p < 0,01$) между уровнем физической активности полярников и субъективной оценкой качества сна. Большее количество пройденных шагов за день соответствовало более легкому ($r = 0,663$) и быстрому ($0,679$) засыпанию, легкому ($0,528$) и быстрому ($0,649$) пробуждению, чувству бодрости ($0,437$) и хорошей координации ($0,696$). Уровень стресса, измеренный алгоритмами Garmin, также был связан ($p < 0,01$) с субъективной оценкой качества сна: с трудным ($0,416$) и долгим ($0,425$) засыпанием, трудным ($0,551$) и долгим ($0,384$) пробуждением, отсутствием бодрости ($0,407$) и нарушениями координации ($0,418$). Были выявлены связи между средним за ночь значением SpO_2 , уровнем стресса ($r = -0,360$, $p < 0,001$) и количеством пройденных за день шагов ($r = 0,312$, $p < 0,001$). Повышение уровня стресса также соответствовало менее точному выполнению теста «РДО экстраполяция» ($r = 0,539$, $p = 0,004$) меньшему ощущению радости ($r = -0,497$, $p = 0,01$).

Социально-психологическая динамика в группе

С наибольшими трудностями в получении данных мы столкнулись при проведении социально-психологических опросников «Социометрия» и ЦОЕ. Полноценные данные по ЦОЕ были получены только при 3-м и 5-м тестированиях. В остальные периоды 1–2 члена экипажа не заполняли опросники или их часть. Социометрический опросник корректно заполняли только 5–6 из 8 обследуемых при каждом тестировании. Другие 2–3 члена экипажа ставили прочерки или писали, что не выбирают «никого». Мы предполагаем, что отказ от заполнения данных опросников связан с чувствительностью к теме межличностных отношений в изолированной малой группе и, возможно, опасением за конфиденциальность результатов теста.

По результатам ЦОЕ в среднем для группы наиболее значимым положительным качеством на протяжении всей экспедиции была «Компетентность» (средний рейтинг за всю экспедицию – 2,48). Чуть меньшей значимостью обладали «Дисциплинированность» (3,78), «Стрессоустойчивость» (3,85) и «Трудолюбие» (4,05). Во время 5–6-го тестирования (после завершения полярной ночи) повысилась значимость

«Спокойствия» (средний рейтинг за два тестирования – 3,81). Такие качества, как «Прямолинейность» (8,64), «Приятность в общении» (7,36) и «Чувство юмора» (6,93), на протяжении всей зимовки отмечались как наименее важные. Самым нежелательным качеством в ходе всей экспедиции являлась «Агрессивность» (2,27). Вторым по значимости негативным качеством в начале экспедиции была «Лицемерность» (4,22), но начиная с 4-го тестирования (полярная ночь) повысили свою значимость «Глупость» (3,93) и «Высокомерность» (4,15). Отмечались как наименее отталкивающие такие качества как «Замкнутость» (8,22), «Пессимистичность» (6,9), «Занудность» (6,38) и «Нечистоплотность» (6,1). При оценке значимости целей экспедиций в среднем наиболее важными считались «Сохранение здоровья и безопасности себя и членов команды» (2,93), «Успешное выполнение всей программы экспедиции» (3,33), «Слаженное преодоление трудностей» (3,86).

При анализе групповой динамики по тестам ЦОЕ описаны результаты за 3–6-е тестирования, когда всеми 8 участниками были практически полностью заполнены бланки тестов. На рис. 4 приведена динамика сплоченности экипажа по 3 критериям. Различия данных показателей в разные периоды тестирования не являются статистически значимыми. При этом можно отметить тенденцию к росту уровня ценностного единства экипажа при оценке значимых отрицательных качеств участника зимовки.

В целом уровень сплоченности группы находился на высоком уровне, за исключением низкой согласованности ценностных приоритетов по отрицательным качествам (в 3-м тестировании). К периоду полярной ночи произошли значительные изменения в демонстрируемых ценностях и единстве группы по данному показателю (4-е тестирование), после чего изменились ценностные приоритеты по положительным качествам и соответствующий показатель сплоченности (5-е и 6-е тестирования) и повысилось целевое единство (6-е тестирование).

Из-за ограниченного количества данных по социометрии мы не смогли получить полноценную картину групповой динамики и групповой структуры, но некоторые индивидуальные показатели поддаются анализу. На основе результатов теста для каждого члена экипажа был рассчитан социометрический статус – степень его «популярности» в группе (рис. 5). На основе имеющихся данных можно предположить, что изменения групповой структуры произошли в период между 1-м тестированием на корабле и окончанием 1-го месяца зимовки на станции «Восток» (конец полярного дня). В этот период обследуемые В-2 и В-5, обладавшие высоким социометрическим статусом по 2 критериям, потеряли свою популярность в группе. Далее в ходе зимовки их статус продолжал постепенно снижаться.

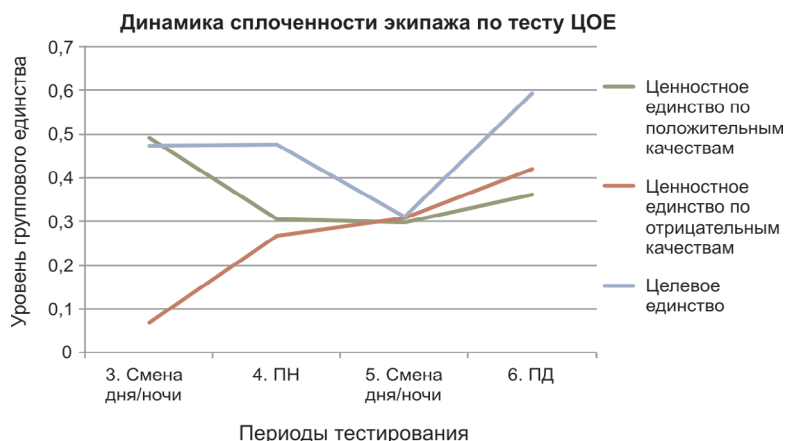


Рис. 4. Динамика сплоченности экипажа (методика ЦОЕ)

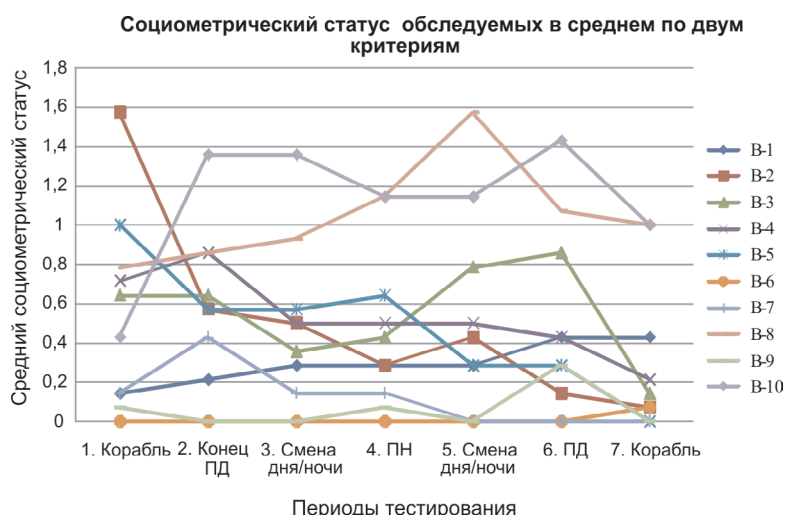


Рис. 5. Динамика социометрического статуса (популярности) членов экипажа.

Приведены средние значения по 2 критериям

Наиболее популярными в среднем за экспедицию были обследуемые В-8 и В-10.

Для оценки сплоченности экипажа также анализировалось количество взаимных выборов в социометрическом тестировании. По показателю совместной работы группа отличалась большей сплоченностью: по этому критерию с 1-го по 6-е тестирование было по 3–4 взаимных выбора. То есть было несколько устойчивых пар обследуемых, которые предпочитали работать вместе. По критерию совместного отдыха было по 1–3 взаимных выбора в тот же период. Скорее всего, это связано с тем, что предпочтения в проведении совместного досуга были менее устойчивы и развиты.

Не обнаружено линейной корреляции между результатами ЦОЕ и «Социометрии». То есть уровень

социометрической популярности полярников не был связан со степенью согласованности их целей и ценностей с остальными членами группы. Также не обнаружено согласованности результатов «Социометрии» и ЦОЕ на уровне пар. У 4 из 5 пар, которые регулярно (более 3 раз за исследование) предпочитали общество друг друга для совместной работы и/или досуга, ценности или цели были схожи (коррелировали, $p < 0,05$) максимум 1–2 раза. У 10 из 12 пар, чьи цели или ценности были схожи в более чем 3 тестированиях, не встречалось ни одного взаимного выбора по «Социометрии». Исключение составляла пара В-4 с В-7: их цели и ценности совпадали при 4 тестированиях, и они трижды выбирали друг друга для совместной работы.

При сопоставлении данных социально-психологических тестов с другими результатами было обнаружено несколько интересных взаимосвязей. Например, уровень физической активности отрицательно коррелировал с социометрической популярностью полярников по критерию совместного проведения досуга ($r = -0,493$, $p < 0,01$). То есть популярнее в группе были менее активные полярники. Также эмоциональный фон обследуемых был связан с уровнем популярности: социометрический статус по критерию совместной работы был отрицательно связан с чувствами усталости ($r = -0,355$, $p = 0,017$), раздражения ($r = -0,410$, $p = 0,005$), тоски ($r = -0,402$, $p = 0,006$) и нерешительности ($r = -0,304$, $p = 0,043$); также статус по критерию совместного отдыха отрицательно коррелировал с раздражением ($r = -0,358$, $p = 0,016$), тоской ($r = -0,517$, $p < 0,001$) и нерешительностью ($r = -0,489$, $p < 0,001$).

По наблюдениям врача экипажа межличностные симпатии установились в начале зимовки и не изменялись после этого. В ходе экспедиции В-7 «замкнулся в себе» – он не участвовал в совместных приемах пищи и совместных работах по жизнеобеспечению станции, пренебрегал гигиеной. Такое поведение сопровождалось снижением социометрического статуса данного члена экипажа. Другой, неуказанный член экспедиции формировал конфликтные ситуации, критиковал начальника станции, что вызывало неодобрение у части группы. Экипаж условно разделился на 2 подгруппы – из 4 и 6 человек. Несмотря на то что большую часть зимовки удавалось «гасить» конфликтные ситуации, дважды они переходили в значительные столкновения.

Первое применение комплекса исследовательских методов на группе полярников позволило выявить методики и средства, которые вызывают наибольшее (гласное или негласное) сопротивление со стороны обследуемых. Это дает возможность разработать наиболее эффективные программы исследований с участием и полярников, и космонавтов.

По наблюдениям врача экипажа особенно активным и продуктивным периодом было начало зимовки. Участники экспедиции были заняты значимой задачей «подготовки к зиме» и отмечали положительное влияние наличия солнечного света. В период полярной ночи активность была ограничена заготовкой снега раз в 2 нед и плановой работой. Кроме того, температура во время полярной ночи ограничивала возможность нахождения на улице. В этот период врачом было замечено общее снижение когнитивных функций у полярников, в частности, у некоторых участников экспедиции появились трудности с подбором слов при коммуникации. По нашим сведениям, после окончания полярного дня и в ходе полярной ночи снижались и настроение, и когнитивные функции обследуемых. Это соответствует литературным сведениям о существенном влиянии заполярных сезонных изменений на психологическое состояние и когнитивные функции обследуемых [9, 10].

В нашем исследовании не было обнаружено связи физической активности (количества шагов) с результатами когнитивных тестов, что противоречит данным авторов работы [19], однако следует отметить, что характер физических нагрузок у полярников на станции «Восток» отличался от такового у выборки европейских зимовщиков, а возможности целенаправленных занятий физическими упражнениями и спортом были ограничены. Отличались также и подходы к оценке когнитивных функций в проводимых исследованиях. С другой стороны, рост физической активности в нашем исследовании был связан с улучшением качества сна зимовщиков, что можно объяснить повышением устойчивости к гипоксии и снижением напряженности благодаря физическим нагрузкам.

С точки зрения групповой сплоченности, наиболее значимым для группы положительным качеством являлся профессионализм («Компетентность»), при этом такие социально значимые качества, как «Агрессивность» и «Лицемерность», отмечались как особенно нежелательные. Значимые для экипажа цели зимовки также были связаны с профессиональными и социальными ценностями. Ранее П. Зюдфелд и Г. Стил (2000) предположили, что высокие показатели добросовестности и доброжелательности (модель «Большой пятерки») являются оптимальными для адаптивного функционирования в изолированной и замкнутой среде с учетом социального контекста. Наблюдавшееся в нашем

исследовании разделение коллектива на подгруппы, в свою очередь, повторяет известные тенденции в изолированных малых группах, ранее отмеченные в том числе, в антарктических исследованиях [8, 22, 31, 32].

Отрицательная корреляция между физической активностью и социометрическим статусом может объясняться тем, что более «активные» полярники совершали прогулки и меньше проводили времени с коллективом. При этом по наблюдениям врача экипажа отдельные социометрически популярные и непопулярные члены экипажа могли быть одинаково физически активны: вместе совершали прогулки.

После окончания полярной ночи, судя по отсутствию записанных данных, практически все участники экспедиции не носили или неправильно носили актиграфы. Это, как и увеличение числа ошибок в когнитивных тестах на завершающем этапе экспедиции, может быть косвенным признаком снижения мотивации к выполнению исследований.

Пилотное исследование психофизиологических и социально-психологических аспектов длительного выполнения профессиональной деятельности в Антарктике с применением подходов авиационно-космической психофизиологии частично подтвердило выдвинутую гипотезу, вместе с тем выявив ряд организационно-методических проблем.

К ним прежде всего следует отнести необходимость высоких требований к надежности используемых аппаратуры и оборудования. Это обусловлено отсутствием возможности их замены (как и в автономном космическом полете), а также существенно меньшим по сравнению с космической практикой временем на обучение их применению.

Еще одной проблемой является отличие мотивации космонавтов и полярников. Ранее в исследовании [33] было показано различие в определяющих мотивацию ценностных ориентациях полярников и космонавтов. Как показывают результаты, зимовщики, будучи более ориентированы на функции выживания, чем на выполнение профессиональных задач, менее, чем космонавты, склонны выполнять необязательные действия, проводить дополнительные работы. Поэтому несомненно, что в дальнейшем полярные психологи должны использовать в Антарктике как можно меньше прямых методов анализа (типа опросников), придавать используемым тестам более привлекательный вид (возможно, игровой характер). В исследовании следует сделать больший акцент на мероприятия психологической поддержки, одновременно используя их в диагностических целях.

Результаты работ подтвердили правильность исходной методологической стратегии выбора в качестве направлений исследований индивидуального психофизиологического состояния, когнитивных функций, социально-психологических аспектов

пребывания в автономных экстремальных условиях.

Пилотное исследование позволило сформулировать основные гипотезы будущих работ. Первая из них связана с развитием в коллективе 2 одновременных разнонаправленных тенденций: сплочения перед лицом воздействующих экстремальных факторов внешней среды и одновременно распада экипажа на более мелкие конфликтующие подгруппы, с появлением лидеров популярности и «изгоев».

Вторая гипотеза связана с негативным влиянием комплекса факторов измененной освещенности (полярная ночь/полярный день) на психофизиологическое состояние (сон, настроение) и работоспособность (физическую и психическую активность) полярников. Еще одним фактором, воздействующим на психофизиологию зимовщиков, являются магнитные поля и другие погодные явления (температура, давление, ветер). Определение степени и динамики астенизации ЦНС должно стать в связи с этим приоритетным направлением исследований.

Третья гипотеза связана с возможностью применения в ходе зимовки психологической поддержки, в том числе основанной на новых информационных технологиях (виртуальная реальность, голосовой помощник) с целью компенсации сенсорной и социальной депривации, а также монотонии. Мы предполагаем, что отработанные для условий космического полета методы психологической поддержки будут эффективны и в условиях зимовки.

Выводы

1. В автономных условиях полярной зимовки апробирован и отработан портативный аппаратно-программный комплекс для оценки уровня психической работоспособности, активности, настроения, качества сна участников длительной экспедиции, а также оценки социально-психологической динамики автономного экипажа.

2. Комплекс позволил оценить динамику психической работоспособности оператора (в том числе когнитивных функций, суточной двигательной активности, продолжительности и качества сна) и сформулировать гипотезы для продолжения исследований. Продолжение исследования позволит оптимизировать планирование режимов труда и отдыха, сложных операторских задач, физических тренировок, рациона питания, а также поможет определить необходимость использования медикаментозных средств профилактики в длительном межпланетном космическом полете.

Благодарим сотрудников Арктического и антарктического научно-исследовательского института, в частности К.К. Левандо, за помощь в организации исследования, а также экипаж 66-й РАЭ на станции «Восток».

Выражаем благодарность магистрантке психологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Николь Диас Рей за помощь в обработке результатов актиграфии.

Работа выполнена в рамках программы Фундаментальных научных исследований РАН FMFR-2024-0034 и FMFR-2024-0042.

Список литературы

1. Suedfeld P. Antarctica and space as psychosocial analogues // REACH. 2018. V. 9. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.reach.2018.11.001.
2. Binsted K., Kobrick R.L., Griofa M.O. et al. Human factors research as part of a Mars exploration analogue mission on Devon Island // Planetary and Space Sci. 2010. V. 58. P. 994–1006. DOI: 10.1016/j.pss.2010.03.001
3. ПАЭ «Восток». URL: [https://www.aari.ru/ekspeditsii/rossiyskaya-antarkticheskaya-ekspeditsiya-\(rae\)/vostok](https://www.aari.ru/ekspeditsii/rossiyskaya-antarkticheskaya-ekspeditsiya-(rae)/vostok).
4. RAE Vostok URL: [https://www.aari.ru/ekspeditsii/rossiyskaya-antarkticheskaya-ekspeditsiya-\(rae\)/vostok](https://www.aari.ru/ekspeditsii/rossiyskaya-antarkticheskaya-ekspeditsiya-(rae)/vostok).
5. Ильин Е.А. Годовое пребывание на станции «Восток» в Антарктиде как аналог длительного космического полета // Космическая медицина и биология. Воронеж, 2013. С. 517–535.
6. Ilyin E.A. One-year stay at Vostok station in Antarctica as an analog of a long space flight // Space medicine and biology. Voronezh, 2013. P. 517–535.
7. Lugg D. Behavioural health in Antarctica: implications for long-duration space missions // Aviation, Space, and Environ. Med. 2005. V. 76 (Supl.). P. 74–77.
8. Olson J.J. Antarctica: a review of recent medical research // Trends Pharmacol. Sci. 2002. V. 23. P. 487–490.
9. Leon G.R., Sandal G.M., Larsen E. Human performance in polar environments // J. of Environ. Psychol. 2011. V. 31. P. 353–360.
10. Palinkas L.A., Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions // Lancet. 2008. V. 369. P. 1–11.
11. Brennen T. Seasonal cognitive rhythms within the Arctic Circle: an individual differences approach // J. of Environ. Psychol. 2001. V. 21 (2). P. 191–199.
12. Pääkkönen T., Leppäluoto J., Mäkinen T.M. et al. Seasonal levels of melatonin, thyroid hormones, mood, and cognition near the Arctic Circle // Aviation, Space, and Environ. Med. 2008. V. 79 (7). P. 695–699.
13. Steinach M., Kohlberg E., Maggioni M.A. et al. Sleep quality changes during overwintering at the German Antarctic stations Neumayer II and III: the gender factor // PLoS One. 2016. Feb 26. V. 11 (2). e0150099. DOI: 10.1371/journal.pone.0150099.
14. Mairesse O., MacDonald-Nethercott E., Neu D. et al. Preparing for Mars: human sleep and performance during a 13 month stay in Antarctica // Sleep. 2019. V. 42. zsy 206. DOI: 10.1093/sleep/zsy206.

13. *Friborg O., Rosenvinge J.H., Wynn R., Gradisar M.* Sleep timing, chronotype, mood, and behavior at an Arctic latitude (69 N) // *Sleep Med.* 2014. V. 15 (7). P. 798–807. DOI: 10.1016/j.sleep.2014.03.014.
14. *Bechtel R.B., Berning A.* The third-quarter phenomenon: do people experience discomfort after stress has passed? // *From Antarctica to outer space: Life in isolation and confinement.* N.Y., 1991. P. 261–266.
15. *Stuster J., Bachelard C., Suedfeld P.* The relative importance of behavioral issues during long-duration ICE missions // *Aviation, Space and Environ. Med.* 2000. V. 71. Section II (Suppl.). P. 17–25.
16. *Leon G.R., Sandal G.M., Larsen E.* Human performance in polar environments // *J. Environ. Psychol.* 2011. V. 31 (4). P. 353–360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2011.08.001>.
17. *Le Roy B., Martin-Krumm C., Pinol N. et al.* Human challenges to adaptation to extreme professional environments: A systematic review // *Neurosci. and Biobehav. Rev.* 2023. V. 146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105054>.
18. *Bosch Bruguera M., Fink A., Schroder V. et al.* Assessment of the effects of isolation, confinement and hypoxia on spaceflight piloting performance for future space missions – The SIMSKILL experiment in Antarctica // *Acta Astronaut.* 2021. V. 179. P. 471–483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.019>.
19. *Abeln V., Klein T., Weber J. et al.* Exercise during isolation: Daily vs. every second day exercise protocols and their (neuro)psychophysiological effects // *Book of abstracts: 24th Annual Congress of the European College of Sport Science.* (3–6 July 2019, Prague) P. 212. URL: <https://www.stk-sport.co.uk/images/sports-science-research-ecss-2019-book-of-abstracts.pdf>.
20. *Strangman G.E., Sipes W., Beven G.* Human cognitive performance in spaceflight and analogue environments // *Aviation, Space, and Environ. Med.* 2014. V. 85 (10). P. 1033–1048.
21. *Sandal G.M., van deVijver F.J.R., Smith N.* Psychological hibernation in Antarctica // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. e2235. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.02235.
22. *Nicolas M., Bishop S., Weiss K., Gaudino M.* Social, occupational, and cultural adaptation during a 12-month wintering in Antarctica // *Aerospace Med. and Hum. Perform.* 2016. V. 87. № 9. P. 781–789.
23. *Nicolas M., Suedfeld P., Weiss K., Gaudino M.* Affective, social, and cognitive outcomes during a 1-year wintering in Concordia // *Environ. and Behav.* 2016. V. 48 (8). P. 1073–1091. URL: <https://doi.org/10.1177/0013916515583551>.
24. *Sarason B.R., Sarason I.G., Pierce G.R.* Social support: An interactional view. 1990.
25. *Palinkas L.A.* Going to extremes: The cultural context of stress, illness and coping in Antarctica // *Social Sci. Med.* 1992. V. 35. P. 651–664.
26. *Roma P.G., Bedwell W.L.* Key factors and threats to team dynamics in long-duration extreme environments // *Team dynamics over time.* 2017. V. 18. P. 155–187.
27. *Иванов А.В., Квасовец С.В., Бубеев Ю.А.* Комплексное нейрокогнитивное тестирование в телемониторинге функционального состояния // *Авиакосм. и экол. мед.* 2022. Т. 56. № 3. С. 71–80.
- Ivanov A.V., Kvasovets S.V., Bubeev Yu.A.* Comprehensive neurocognitive testing in telemonitoring of the functional state // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2022. V. 56. № 3. P. 71–80.
28. Garmin Connect. URL: <https://connect.garmin.com>
29. Социально-психологический климат коллектива: Спецпрактикум по социальной психологии / Ю.М. Жуков, ред. М., 1981.
- Socio-psychological climate of the team: Special workshop on social psychology / Yu.M. Zhukov, ed. Moscow, 1981.
30. *Савинкина А.О.* Методика диагностики сплоченности спортивной команды (на примере футбола) // *Спортивный психолог.* 2015. № 4 (39). С. 69–75.
- Savinkina A.O.* A method for diagnosing the cohesion of a sports team (on the example of football) // *Sportivny psikholog.* 2015. № 4 (39). P. 69–75.
31. *Palinkas L.A.* Sociocultural influences on psychosocial adjustment in Antarctica // *Med. Anthropol.* 1989. V. 10. P. 235–246.
32. *Weiss K., Feliot-Rippeault M., Gaud R.* Uses of places and setting preferences in a French Antarctic station // *Environ. and Behav.* 2007. V. 39 (2). P. 147–164.
33. *Vinokhodova A.G., Gushin V.I.* Study of values and interpersonal perception in cosmonauts on board of International space station // *Acta Astronaut.* 2014. V. 93. P. 359–365.

Поступила 10.08.2023

INVESTIGATION OF PSYCHIC PERFORMANCE AND GROUP DYNAMICS IN THE AUTONOMOUS CONDITIONS OF WINTERING ON STATION «VOSTOK»

**Kuznetsova P.G., Korotaev K.S.,
Lebedeva S.A., Shved D.M., Savinkina A.O.,
Gushchin V.I., Ilyin E.A.**

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper deals with the investigation of psychic performance and group dynamics during Russian Antarctic expedition RAE66. Eight winterers were tested 7 times with the use of the cognitive Master-Test. Group dynamics was assessed by sociometry and cohesion diagnostics on the basis of common goals and values. Psychophysiological status was assessed weekly using the actigraphy and HR data, and questionnaires.

At the end of the polar day and in early autumn, it was the mood that went down first (autumn and winter), then

accuracy of sensorimotor reactions degraded (winter) and mistakes in a simple math test became more frequent (winter and spring). On the contrary, performance of short-term memory tests improved in winter and spring. Motor activity reduced during the first half of the expedition and started increasing gradually at the beginning of the polar night. Though the sleeping time was normally from 7 to 8.5 hours, sleep quality subjectively changed during the wintering it correlated with physical activity and consequent changes of heart rate variability (stress) and blood oxygen saturation. The latter remained low throughout the period of life on

station Vostok in comparison to measurements made on the ship. Cohesion was high but for some slackening by the third quarter of wintering; at the end of wintering cohesion grew strong again. The sociometric status of winterers varied with intensity of negative emotions.

Key words: psychophysiology, mental performance, Antarctic expedition, analog experiment, extreme conditions, autonomous crew, cohesion.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 68–79.

УДК 612.017.1

ВЛИЯНИЕ КРАТКОСРОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ГЕРМООБЪЕКТЕ МАЛОГО ОБЪЕМА НА СУБКЛИНИЧЕСКУЮ РЕАКТИВАЦИЮ ЛАТЕНТНЫХ ПАТОГЕНОВ ЧЕЛОВЕКА ВИРУСНОЙ И БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПРИРОДЫ

Шульгина С.М., Рыкова М.П., Кутько О.В., Шмаров В.А., Антропова Е.Н., Жирова Э.А., Орлова К.Д., Садова А.А., Власова Д.Д., Пономарев С.А.

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

E-mail: sofiya.kayunova@mail.ru

В статье представлено исследование субклинической реактивации 7 герпесвирусов человека, а также бактерий *Mycoplasma hominis*, *Ureaplasma urealiticum* и *Chlamydia trachomatis* у 6 участников 14-суточной изоляции в гермообъекте малого объема с искусственной средой обитания. Проанализированы корреляции между уровнем ДНК латентных патогенов вирусной и бактериальной природы в биологических жидкостях организма и показателями системы врожденного и адаптивного иммунитета.

Установлено, что кратковременное пребывание человека в условиях гермообъекта малого объема может приводить к реактивации латентных патогенов не только вирусной, но и бактериальной природы. Такие проявления могут быть связаны с изменением иммунного статуса человека и как следствие снижением иммунологического контроля латентных инфекций. Динамика литического цикла латентных инфекций в ходе краткосрочной изоляции демонстрировала высокую степень индивидуальной вариабельности.

Ключевые слова: иммунитет, латентные инфекции, реактивация, изоляция, космический полет.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 80–87.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-80-87

Комплекс факторов космического полета (КП) (физическая и психологическая изоляция, замкнутая среда обитания, монотония, гиподинамия, микрогравитация) оказывает существенное влияние на состояние иммунной системы человека, приводя к нарушению функциональной активности различных ее звеньев [1]. В рамках как краткосрочных, так и долгосрочных КП у космонавтов наблюдалось изменение цитокинового профиля, а также фенотипических и функциональных характеристик клеток врожденного и адаптивного иммунитета, в том числе Т-лимфоцитов и NK-клеток, осуществляющих контроль латентных инфекций вирусной и бактериальной природы [2–7]. В ходе наземных изоляционных экспериментов в период ранней адаптации также были показаны значительные изменения в цитокиновом профиле и субпопуляционном составе клеток врожденного и адаптивного иммунитета,

что может свидетельствовать о роли таких факторов как изоляция, гиподинамия и психологический стресс в модуляции иммунного ответа [8–10].

Следствием значительных изменений иммунного статуса в период ранней адаптации к стрессовым условиям является снижение иммунологического надзора за латентными инфекциями и как следствие активация литического цикла латентных патогенов. Так, в рамках краткосрочных КП в плазме и слюне космонавтов отмечалось повышение содержания ДНК латентных герпесвирусов, в том числе цитомегаловируса (ЦМВ), вируса Эпштейна – Барр (ВЭБ), а также вируса ветряной оспы (ВВО) в комплексе с изменением в крови титров специфических антител и повышением содержания провоспалительных цитокинов [11, 12]. Однако изменение функциональной активности иммунной системы космонавтов может стать причиной реактивации не только моно-, но и микст-латентных патогенов вирусной и бактериальной природы. Поскольку в настоящее время реактивация бактериальных инфекций в условиях КП и наземных стендовых экспериментов практически не изучена, рассмотрение влияния факторов КП на латентные инфекции с точки зрения микст-инфекционного процесса представляет значительный интерес. Так, показано, что первичная инфекция и реактивация *Chlamydia trachomatis* как *in vivo* (в крови и в эпителиальных клетках шейки матки), так и *in vitro* (в клеточных культурах Т-лимфоцитов, несущих встроенный геном ВГЧ-6) способствует инициации реактивации вируса герпеса человека 6-го типа (ВГЧ-6) [13]. Кроме того, хламидийная инфекция сильно повышает чувствительность клеток к первичному инфицированию ВГЧ-6, который, в свою очередь, тормозит жизненный цикл хламидии и вызывает ее персистенцию [14–16].

Цель данного исследования – изучение влияния комплекса факторов, ассоциированных с краткосрочным пребыванием человека в условиях гермообъекта малого объема на реактивацию латентных инфекций человека вирусной и бактериальной природы.

Методика

Материалом для исследования служила периферическая кровь, взятая из локтевой вены с помощью коммерческих вакуумных систем BD Vacutainer (Greiner-bio-one, Австрия), со стандартным содержанием антикоагулянтов (K3-EDTA), а также образцы мочи и слюны 6 участников 14-суточного изоляционного эксперимента «Эскиз» (4 мужчин и 2 женщины). Биоматериал был взят на 7-е и 2-е сутки до начала изоляции (-7-е и -2-е сутки), на 3, 7 и 14-е сутки пребывания в гермообъекте и на 7-е сутки после завершения изоляции (+7-е сутки). Программа исследований была одобрена Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 573 от 01.04. 2021 г.).

ДНК исследуемых патогенов (таблица) выделялась из 1 мл слюны, 0,2 мл плазмы и 2 мл мочи с использованием коммерческого набора ДНК-экстракция 3 (АО «Вектор-бест», Россия). Содержание ДНК всех исследуемых патогенов (МЕ/мл) (см. табл.) определялось методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР) с применением коммерческих наборов «РеалБест ДНК» (АО «Вектор-бест», Россия). Учет результатов ПЦР проводился на приборе Bio-Rad CFX-96 (Bio-Rad Laboratories, США). Для обработки данных использовалась программа Bio-Rad CFXManager.

Уровень специфических антител к исследуемым патогенам (см. табл.) в сыворотке крови определялся методом иммуноферментного анализа с применением коммерческих наборов «Вектор-бест» (АО «Вектор-бест», Россия). Содержание цитокинов в сыворотке испытуемые определяли с помощью мультиплексного анализа и с использованием

коммерческой панели MILLIPLEX MAP Human Cytokine (Merck Millipore, США). Уровень кортизола в сыворотке крови определяли с помощью коммерческого набора DBC (Diagnostics Biochem, Канада, Великобритания), а уровни адреналина и норадреналина в плазме крови измеряли с помощью набора CatCombi ELISA (IBL international, Германия).

Статистическая обработка данных велась с помощью программного обеспечения GraphPad Prism 8.0.2. (GraphPad Software Inc., США). Для расчета достоверности различий средних значений концентрации вирусной ДНК и титров специфических антител между последовательными этапами экспериментов использовался односторонний критерий ANOVA с множественным апостериорным тестом Tukey. Различия считались достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. При этом в представленных данных одна звездочка (*) указывает на значение $p \leq 0,05$, а 2 звездочки (**) – на значение $p \leq 0,01$ в используемом критерии. Для установления корреляций между иммунными показателями и уровнем ДНК исследуемых патогенов в биообразцах был использован непараметрический критерий ранговой корреляции Спирмена. Коэффициент корреляции также считался достоверным при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Ранее было показано [9], что пребывание здорового человека в условиях 14-суточной изоляции в гермообъекте малого объема оказывает существенное влияние на фенотипические характеристики и резервные возможности клеточных факторов систем врожденного и адаптивного иммунитета.

Таблица

Исследуемые латентные патогены человека

Патоген	Принятое сокращение	Исследуемые специфические антитела
Вирус простого герпеса 1-го и 2-го типов	ВПГ-1/2	ВПГ-1 IgG; ВПГ-2 IgG; авидность IgG к ВПГ-1/2
Вирус ветряной оспы	ВВО	IgG; IgG к поверхностному гликопротеину gE
Вирус Эпштейна – Барр	ВЭБ	IgG к капсидному белку VCA; авидность IgG к капсидному белку VCA; IgG к ядерному антигену EBNA-1; IgG к раннему антигену EA
Цитомегаловирус	ЦМВ	IgG; IgG к белку IEA; авидность IgG к ЦМВ
Вирус герпеса человека 6-го типа	ВГЧ-6	IgG
Вирус герпеса человека 8-го типа	ВГЧ-8	IgG
<i>Mycoplasma hominis</i>	<i>Mycoplasma hominis</i>	IgG; IgA
<i>Ureaplasma urealyticum</i>	<i>Ureaplasma urealyticum</i>	IgG; IgA
<i>Chlamydia trachomatis</i>	<i>Chlamydia trachomatis</i>	IgG; IgA; IgG к белку cHSP60; IgG к главному белку наружной мембраны MOMP и мембрано-ассоциированному плазмидному белку Pgp3 <i>Chlamydia trachomatis</i>

Анализ состояния системы сигнальных образ-распознающих рецепторов семейства Toll-like (TLR) клеток врожденного иммунитета, включающий определение представленности и уровня экспрессии генов TLR1, TLR2, TLR3, TLR4, TLR5, TLR6, TLR8 и TLR9 в моноцитах и гранулоцитах периферической крови, позволил выявить гетерогенную реакцию системы TLR на условия гермообъекта. Важно отметить, что за 2 сут до начала изоляции наблюдалось изменение количества TLR2+, TLR3+, TLR6+ и TLR8+-моноцитов, что в комплексе с изменением уровня гормонов стресса (адреналина, норадреналина и кортизола) в периферической крови может указывать на значительную роль психогенного компонента, реализующегося через гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковую ось, в формировании иммунного ответа в ходе эксперимента.

На основании анализа содержания в периферической крови испытуемых «наивных» Т-лимфоцитов ($CD3^+CD45RA^+CD62L^+$), Т-клеток центральной ($CD3^+CD45RO^+CD62L^+$) и эффекторной памяти ($CD3^+CD45RO^+CD62L^-$) было выявлено, что для 7-х суток пребывания в гермообъекте характерно снижение относительного содержания наивных $CD4^+$ -Т-лимфоцитов, а также повышение относительного содержания центральных $CD8^+$ -Т-клеток памяти и $CD4^+$ -Т-клеток эффекторной памяти. Кроме того, отмечалось статистически достоверное повышение относительного содержания $CD4^+$ -Т-клеток эффекторной памяти на 14-е сутки экспериментального воздействия.

В то же время в рамках данного исследования представляло интерес проанализировать влияние комплекса иммунологических изменений, вызванных 14-суточной изоляцией в гермообъекте малого объема, на реактивацию латентных патогенов человека вирусной и бактериальной природы.

Так, ДНК исследуемых латентных патогенов была обнаружена только в образцах слюны, в то время как в моче и плазме испытуемых искомая ДНК выявлена не была. Помимо этого, в слюне 5 из 6 участников 14-суточного эксперимента «Эскиз» была обнаружена ДНК ВГЧ-6. Причем у 4 испытуемых пик содержания вирусной ДНК приходился на 7–14-е сутки изоляции, в то время как у 1 испытуемого максимальный уровень вирусной ДНК в слюне был отмечен на -7-е и +7-е сутки эксперимента (рис. 1, А). При этом значительное снижение титров специфических антител было отмечено только у 1 испытуемого на -2-е сутки эксперимента (см. рис. 1, Б).

Стоит отметить, что фоновый период изоляции (-7 сут) характеризовался слабой зависимостью уровня ДНК ВГЧ-6 в слюне от иммунологических параметров (рис. 2). Однако были отмечены положительные корреляции уровня вирусной ДНК с абсолютным количеством регуляторных Т-лимфоцитов $CD4^+CD25^+$ (T-reg) и «наивных» $CD8^+$ Т-клеток $CD3^+CD8^+CD62L^+CD45RA^+$ ($CD8^+$ T-N). С усилением адаптивной нагрузки в период подготовки (за 2 сут до начала изоляции) роль иммунологических показателей в динамике литической инфекции

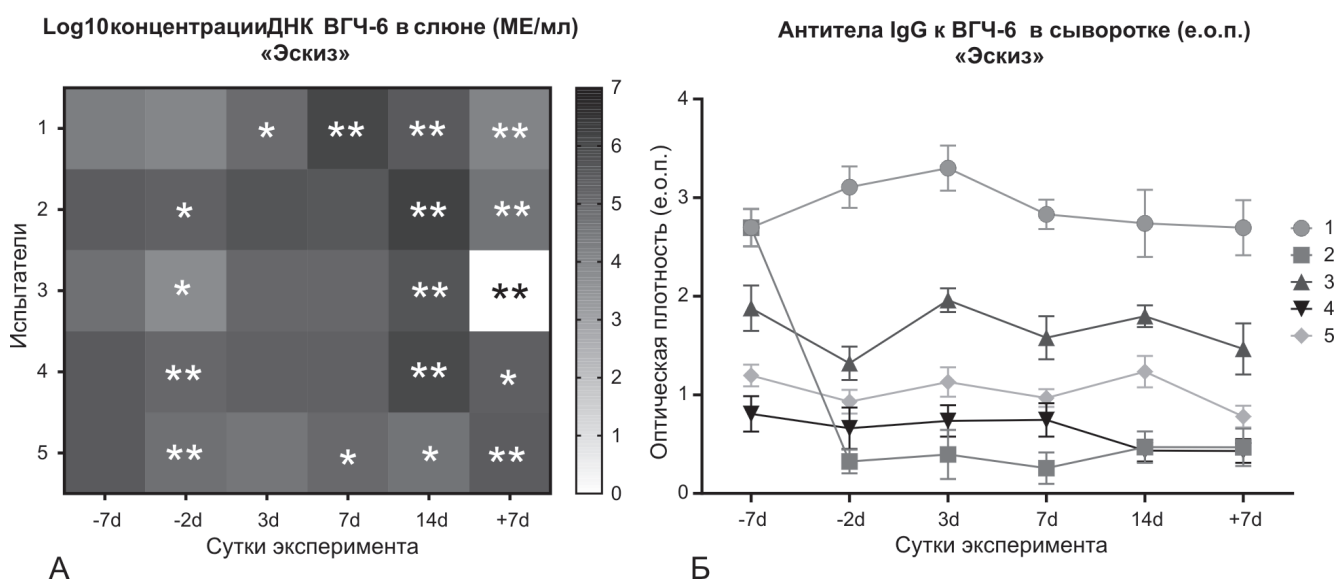


Рис. 1. А – динамика содержания ДНК ВГЧ-6 в слюне участников эксперимента «Эскиз». Значения представлены в виде десятичного логарифма концентрации вирусной ДНК в слюне испытуемых (МЕ/мл); Б – динамика изменения титров антител IgG к ВГЧ-6 в сыворотке участников эксперимента «Эскиз». Значения представлены в виде единиц оптической плотности (е.о.п.) ± стандартное отклонение

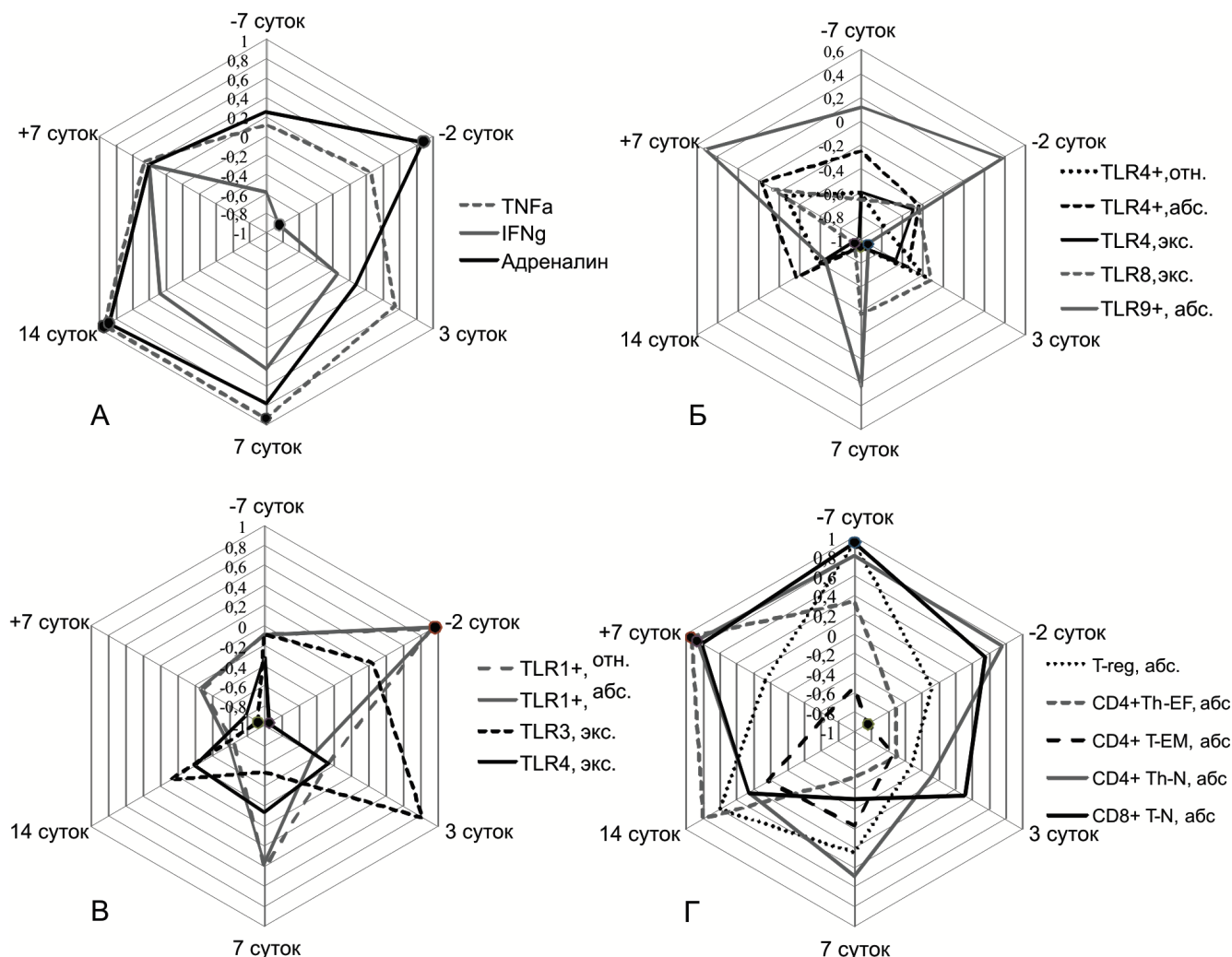


Рис. 2. Выявленные динамики корреляций уровня ДНК ВГЧ-6 в слюне испытуемых с иммунологическими показателями крови.

А – корреляции уровня ДНК ВГЧ-6 с концентрацией цитокинов TNFα и IFNγ (пг/мл), а также гормона стресса адреналина (нг/мл); Б – корреляции ДНК ВГЧ-6 с относительным и абсолютным содержанием моноцитов, несущих TLR4 и TLR9, а также с уровнем экспрессии TLR4 и TLR8 в моноцитах; В – корреляции ДНК ВГЧ-6 с относительным и абсолютным содержанием гранулоцитов, несущих TLR1, а также с уровнем экспрессии TLR3 и TLR4 в гранулоцитах; Г – корреляции ДНК ВГЧ-6 с абсолютным количеством ряда субпопуляций Т-лимфоцитов. Черными точками отмечены достоверные значения коэффициентов корреляции с $p \leq 0,05$. Относительное (отн.) количество клеток представляет собой процент клеток с данным фенотипом в рассматриваемом клеточном пуле. Абсолютное (абс.) количество клеток представляет собой количество клеток с данным фенотипом в 1 мл крови. Экс. – экспрессия гена, кодирующего данный фактор, в рассматриваемых клетках; Th – Т-хелперы; EF – эффекторные Т-клетки; EM – клетки эффекторной памяти; N – «наивные» клетки

ВГЧ-6 возрастала. При этом наблюдалось усиление влияния абсолютного и относительного количества моноцитов и гранулоцитов, несущих на своей поверхности рецептор TLR1, а также концентрации адреналина в сыворотке крови. Однако обратная взаимосвязь содержания ДНК ВГЧ-6 в слюне с концентрацией интерферона-гамма (IFNγ) в сыворотке, уровнем экспрессии TLR4 в гранулоцитах и абсолютным количеством Т-хелперов эффекторной памяти CD3+CD4+CD62L-CD45RA- (CD4+T-EM)

может указывать на ослабление противовирусной активности системы врожденного иммунитета. Важно отметить, что в ходе эксперимента менялись и количество, и направление корреляций.

В течение 1-й недели пребывания в условиях гермообъекта в рамках краткосрочной изоляции наиболее выраженное отрицательное влияние на уровень ДНК ВГЧ-6 имели абсолютное число TLR9-моноцитов, относительное и абсолютное содержание в крови TLR4-моноцитов, а также уровень

экспрессии TLR4 в моноцитах. В то же время положительная корреляция уровня ДНК ВГЧ-6 с концентрацией TNF α в крови, наблюдаемая во второй половине пребывания испытуемых в гермообъекте, в совокупности с отсутствием клинической картины литической инфекции может указывать на сохранение функциональной активности иммунной системы в рамках краткосрочной изоляции.

На завершающем этапе краткосрочной изоляции выраженное влияние на содержание ДНК ВГЧ-6 в слюне имел уровень адреналина в крови испытуемых. Также важно отметить появление в этот период негативной корреляции содержания ДНК ВГЧ-6 с уровнем экспрессии TLR8 в моноцитах, указывающей на сохраняющееся подавление врожденного противовирусного ответа.

В период восстановления на 7-е сутки после выхода из гермообъекта отмечалось сохранение негативных корреляций показателей системы врожденного иммунитета, а также выявлялись положительные корреляции абсолютного количества эффекторных CD3+CD4+CD25+CD62L-CD45RA+ (CD4+Th-EF) и наивных CD3+CD4+CD25+CD62L+CD45RA+ (CD4+Th-N) Т-хелперов и уровня вирусной ДНК, что может свидетельствовать о повышении роли системы адаптивного иммунитета в противовирусном ответе.

В слюне всех испытуемых была обнаружена ДНК ВЭБ на фоне стабильно высокого уровня специфических антител хотя бы на одном из этапов эксперимента (рис. 3). При этом у 3 из 6 испытуемых пик содержания вирусной ДНК пришелся на 7–14-е сутки эксперимента, а еще у 2 испытуемых – на -7-е сутки и +7-е сутки соответственно. Также у 1 испытуемого наблюдалась двухфазовая кривая содержания ДНК ВЭБ, первый пик которой пришелся на -7-е сутки, а второй – на 14-е сутки эксперимента.

Важно отметить, что в рамках изоляции для контроля литического цикла ВЭБ-система адаптивного иммунитета играла большую роль, чем для ВГЧ-6 (рис. 4). Так, в фоновый период эксперимента были выявлены только положительные корреляции уровня ДНК ВЭБ с абсолютным числом CD4+ Т-лимфоцитов и регуляторных Т-лимфоцитов. За 2 сут до начала изоляции и в первой половине периода пребывания испытуемых в гермообъекте наиболее выраженное влияние на течение литического цикла ВЭБ имело количество наивных CD4+ и CD8+ Т-клеток, абсолютное количество регуляторных клеток центральной памяти CD3+CD4+CD25+CD62L+CD45RA- (CD4+Th-CM) и «наивных» регуляторных Т-клеток CD3+CD4+CD25+CD62L+CD45RA+ (CD4+Th-N). Однако появление отрицательных корреляций с концентрацией IFN γ в сыворотке, а также абсолютным и относительным количеством TLR1-гранулоцитов за 2 сут до начала изоляции и в первые сутки пребывания в гермообъекте может свидетельствовать

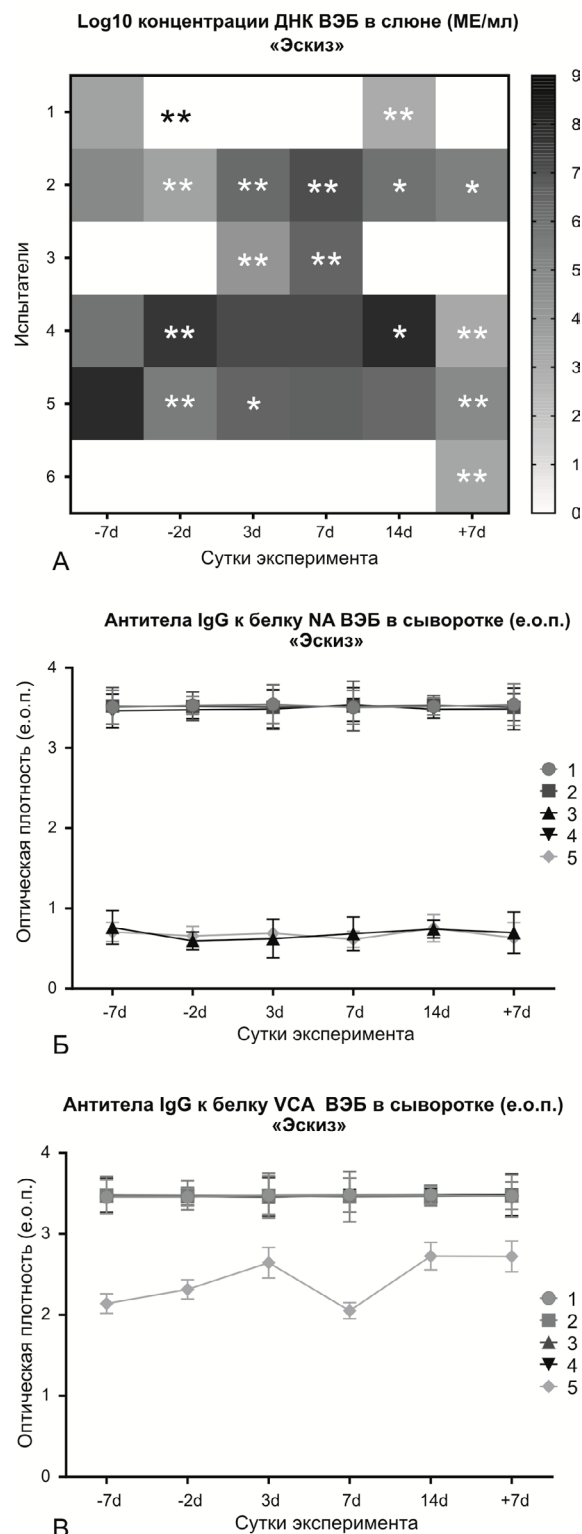


Рис. 3. А – динамика содержания ДНК ВЭБ в слюне испытуемых. Значения представлены в виде десятичного логарифма концентрации вирусной ДНК в слюне (МЕ/мл). Б – динамика изменения титров антител IgG к белку NA ВЭБ в сыворотке испытуемых; В – динамика изменения титров антител IgG к белку VCA ВЭБ в сыворотке испытуемых. Значения представлены в виде единиц оптической плотности (е.о.п.) $\pm$ стандартное отклонение

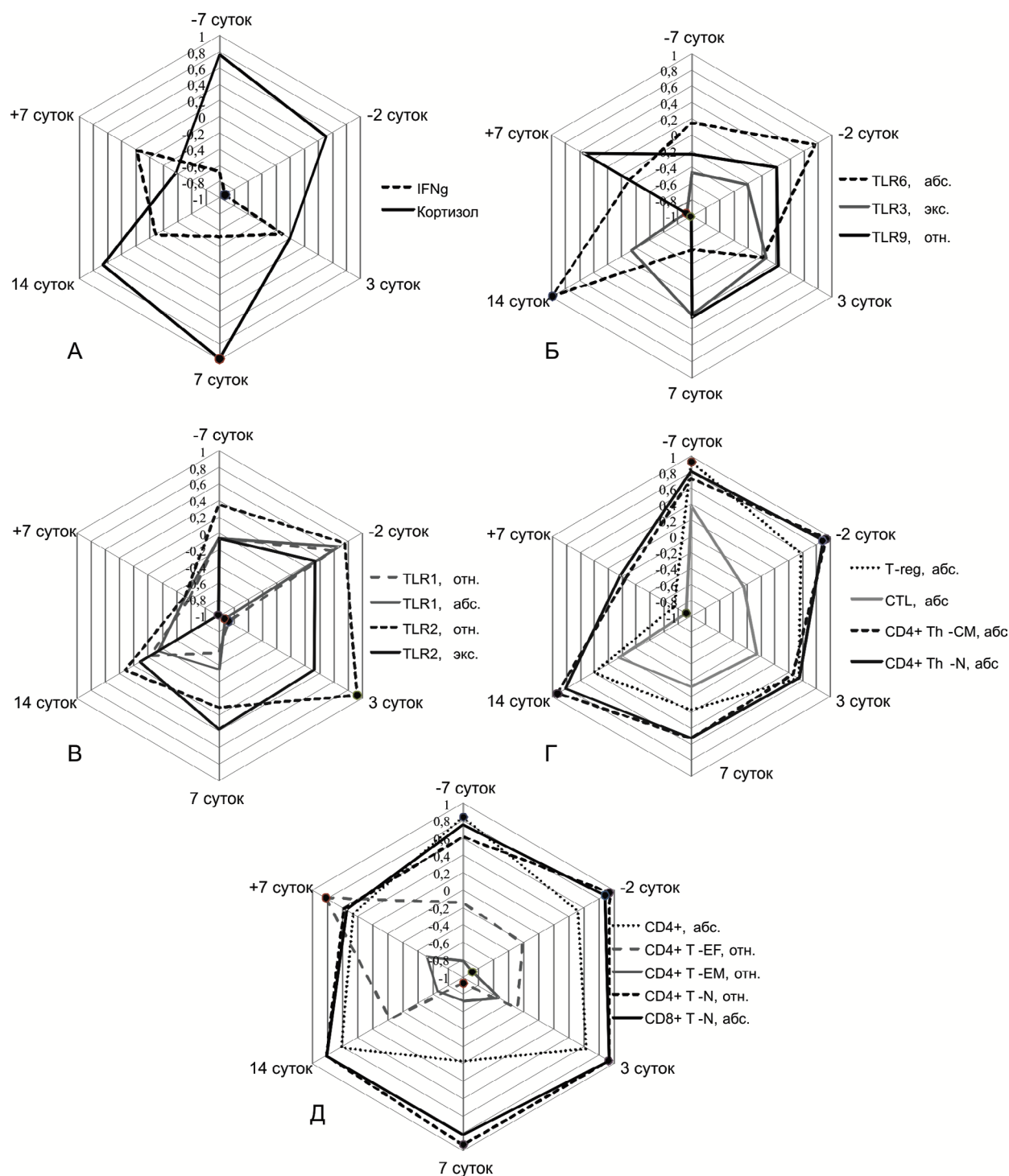


Рис. 4. Динамика корреляций уровня ДНК ВЭБ в слюне испытуемых с иммунологическими показателями крови.

А – корреляции ДНК ВЭБ с уровнем цитокина IFN γ (пг/мл), а также гормона стресса кортизола (нг/мл); Б – корреляции ДНК ВЭБ с относительным и абсолютным содержанием моноцитов, несущих TLR6 и TLR9, а также с уровнем экспрессии TLR3 в моноцитах; В – корреляции ДНК ВЭБ с относительным и абсолютным содержанием гранулоцитов, несущих TLR1 и TLR2, а также с уровнем экспрессии TLR2 в гранулоцитах; Г – корреляции ДНК ВЭБ с относительным и абсолютным количеством ряда субпопуляций CD25⁺ Т-лимфоцитов; Д – корреляции ДНК ВЭБ с абсолютным количеством ряда субпопуляций CD25⁺ Т-лимфоцитов. Черными точками отмечены достоверные значения коэффициентов корреляции с $p \leq 0,05$. Относительное (отн.) количество клеток представляет собой процент клеток с данным фенотипом в рассматриваемом клеточном пуле. Абсолютное (абс.) количество клеток представляет собой количество клеток с данным фенотипом в 1 мл крови. Экс. – экспрессия гена, кодирующего данный фактор, в рассматриваемых клетках; Th – Т-хелперы; CTL – цитотоксические Т-лимфоциты; CM – клетки центральной памяти; EF – эффекторные Т-клетки; EM – клетки эффекторной памяти; N – «наивные» клетки

о снижении функциональной активности врожденного звена иммунитета на фоне сохранения эффективности адаптивного иммунного ответа.

Вторая половина периода изоляции характеризовалась снижением степени корреляции иммунологических показателей крови с уровнем ДНК ВЭБ в слюне, что может являться признаком положительной динамики адаптации иммунной системы к условиям гермообъекта малого объема (см. рис. 4). Однако появление отрицательной корреляции уровня ДНК ВЭБ с относительным содержанием TLR9-моноцитов может указывать на наличие дисбаланса врожденного звена противовирусного иммунного ответа, сохраняющегося и в течение периода постизоляционного восстановления.

У 2 участников эксперимента в слюне была отмечена субклиническая реактивация ВПГ-1/2 на 3-и и 7-е сутки эксперимента соответственно, на фоне стабильно высокого уровня специфических антител к ВПГ-1 у одного и к ВПГ-2 у другого испытуемого (рис. 5). Однако статистически значимых корреляций содержания ДНК ВПГ-1/2 в слюне с иммунологическими показателями обнаружено не было.

Однако наиболее интересным результатом данного исследования явилось обнаружение бессимптомной реактивации бактериального патогена *Mycoplasma hominis*. Максимальные значения содержания ДНК данного патогена в слюне пришлось на -2-е и 14-е сутки изоляции на фоне стабильно низкого уровня специфических антител (рис. 6).

Для данного испытуемого были выявлены статистически достоверные положительные корреляции уровня ДНК *Mycoplasma hominis* с показателями как врожденного, так и адаптивного иммунитета, в том числе с общим количеством лимфоцитов и абсолютным количеством В-лимфоцитов, а также с относительным количеством регуляторных Т-клеток с фенотипом CD3+CD4+25+CD62L-CD45RA+ и наивных Т-хелперов CD3+CD4+CD62L+CD45RA+. Кроме того, была отмечена взаимосвязь изменения уровня бактериальной ДНК с абсолютным количеством TLR4-моноцитов, относительным количеством TLR6-моноцитов и концентрацией TNFα в сыворотке.

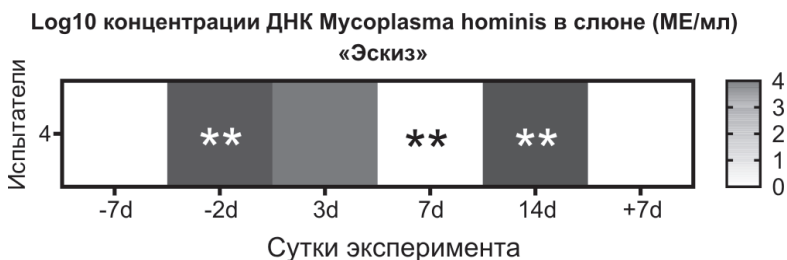
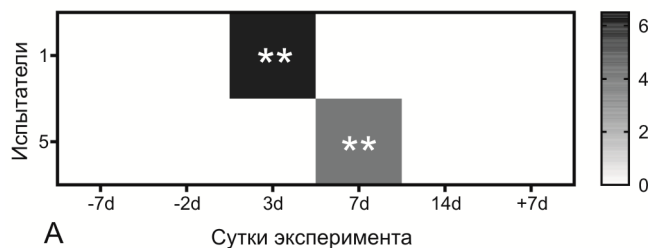


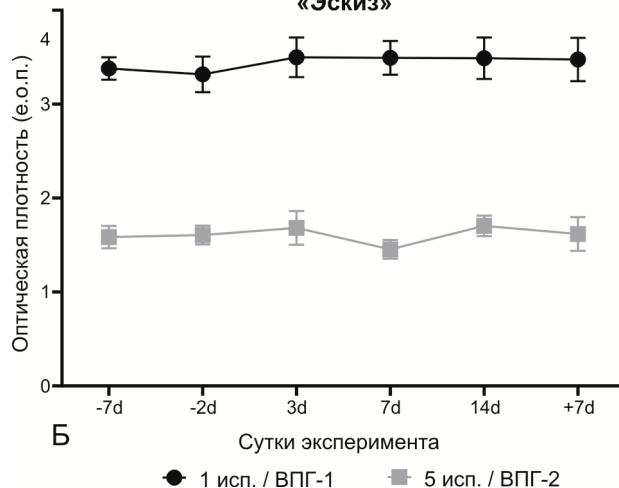
Рис. 6. Динамика содержания ДНК *Mycoplasma hominis* в слюне участника эксперимента № 4

Log10 концентрации ДНК ВПГ-1/2 в слюне (МЕ/мл)
«Эскиз»



А

Антитела IgG к ВПГ-1 и ВПГ-2 в сыворотке (е.о.п.)
«Эскиз»



Б

Рис. 5. А – динамика содержания ДНК ВПГ-1/2 в слюне испытуемых. Значения представлены в виде десятичного логарифма концентрации вирусной ДНК в слюне испытуемых (МЕ/мл); Б – динамика изменения титров антител IgG к ВПГ-1 и ВПГ-2 в сыворотке участников эксперимента «Эскиз». Значения представлены в виде единиц оптической плотности (е.о.п.) ± стандартное отклонение

Таким образом, в рамках данного исследования было установлено, что даже кратковременное пребывание человека в условиях гермообъекта может приводить к субклинической реактивации латентных патогенов не только вирусной, но и бактериальной природы, что может быть связано с истощением иммунной системы под действием комплекса стрессовых факторов. Однако динамика содержания ДНК латентных патогенов в биологических жидкостях и изменение титров специфических антител крайне индивидуальны.

Выводы

1. Кратковременное пребывание человека в условиях гермообъекта малого объема может приводить к субклинической реактивации латентных патогенов не только вирусной, но и бактериальной природы.

2. В ходе кратковременной изоляции были выявлены взаимосвязи между уровнем ДНК латентных патогенов в слюне и плазме и показателями систем врожденного и адаптивного иммунитета.

3. Динамика реактивации латентных инфекций и специфический антителый ответ в ходе эксперимента имеют высокую степень индивидуальной вариабельности.

Список литературы

1. Моруков Б.В., Рыкова М.П., Антропова Е.Н. и др. Показатели врожденного и адаптивного иммунитета космонавтов после длительных космических полетов на Международной космической станции // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 3. С. 19–30.

Morukov B.V., Rykova M.P., Antropova E.N. et al. Parameters of the innate and adaptive immunity in cosmonauts after long-term space flight on board the International space station // Fiziologiya cheloveka. 2010. V. 36. № 3. P. 264–273.

2. Crucian B.E., Stowe R.P., Pierson D.L. et al. Immune system dysregulation following short- vs long-duration spaceflight // Aviat. Sp. Env. Med. 2008. V. 72. № 9. P. 835.

3. Kaur I., Simons E.R., Castro V.A. et al. Changes in monocyte functions of astronauts // Brain Behav. Immun. 2005. V. 19. P. 547.

4. Stowe R.P., Sams C.F., Mehta S.K. et al. Leukocyte subsets and Neutrophil function after short-term spaceflight // J. Leukoc. Biol. 1999. V. 65. P. 179.

5. Meshkov D., Rykova M. The natural cytotoxicity in cosmonauts on board space stations // Acta Astronaut. 1995. V. 36. P. 719.

6. Crucian B., Stowe R., Mehta S. et al. Immune system dysregulation occurs during short duration spaceflight on board the space shuttle // J. Clin. Immunol. 2013. V. 33. № 2. P. 456.

7. Crucian B.E., Zwart S.R., Mehta S.K. et al. Plasma cytokine concentrations indicate that in vivo hormonal regulation of immunity is altered during long-duration spaceflight // J. Interf. Cytok. Res. 2014. V. 34. P. 778.

8. Crucian B., Simpson R.J., Mehta S. et al. Terrestrial stress analogs for spaceflight associated immune system dysregulation // Brain Behav. Immun. 2014. V. 39. P. 23.

9. Ponomarev S.A., Sadova A.A., Rykova M.P. et al. The impact of short-term confinement on human innate immunity // Sci. Rep. 2022. V. 12. № 1. Art. 8372.

10. Ponomarev S., Kutko O., Rykova M. et al. Changes in the cellular component of the human innate immunity system in short-term isolation // Acta Astronaut. 2020. V. 166. P. 89.

11. Mehta S.K., Laudenslager M.L., Stowe R.P. et al. Multiple latent viruses reactivate in astronauts during Space Shuttle missions // Brain Behav. Immun. 2014. V. 41. P. 210.

12. Mehta S.K., Crucian B.E., Stowe R.P. et al. Reactivation of latent viruses is associated with increased plasma cytokines in astronauts // Cytokine. 2013. V. 61. P. 205.

13. Prusty B.K., Siegl C., Hauck P. et al. Chlamydia trachomatis infection induces replication of latent HHV-6 // PLoS One. 2013. V. 8. № 4. Art. e61400.

14. Deka S., Vanover J., Dessus-Babus S. et al. Chlamydia trachomatis enters a viable but non-cultivable (persistent) state within herpes simplex virus type 2 (HSV-2) co-infected host cells // Cell. Microbiol. 2006. V. 8. P. 149.

15. Vanover J., Sun J., Deka S. et al. Herpes simplex virus co-infection-induced Chlamydia trachomatis persistence is not mediated by any known persistence inducer or anti-chlamydial pathway // Microbiol. 2008. V. 154. P. 971.

16. Prusty B.K., Bohme L., Bergmann B. et al. Imbalanced oxidative stress causes chlamydial persistence during non-productive human herpes virus co-infection // PLoS One. 2012. V. 7. Art. e47427.

Поступила 02.11.2023

EFFECT OF SHORT-TERM ISOLATION AND CONFINEMENT IN A SMALL CHAMBER ON SUBCLINICAL REACTIVATION OF LATENT VIRAL AND BACTERIAL PATHOGENES IN HUMANS

Shulguina S.M., Rykova M.P., Kutko O.V., Shmarov V.A., Antropova E.N., Zhirova E.A., Orlova K.D., Sadova A.A., Vlasova D.D., Ponomarev S.A.

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper presents data of the investigations of subclinical reactivation of 7 human herpes viruses and bacteria Mycoplasma hominis, Ureaplasma urealiticum and Chlamydia trachomatis from 6 participants in a 14-day isolation study conducted in a small chamber with controlled environment. Purpose of analysis was to establish correlations between DNAs of latent viral and bacterial pathogens in bio-liquids of organism and indices of the natural and adaptive immune system.

It was determined that short-term isolation in a small chamber may provoke reactivation of latent pathogens both of the viral and bacterial nature. The events can be triggered by changes in the immune status and appear in consequence of depressed immunological control of latent infections. Dynamics of the latent infections lytic cycle in the course of the study demonstrated a high degree of individual variability.

Key words: immunity, latent infections, reactivation, isolation, space flight.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 80–87.

УДК 612.825+612.885

МЕТОДИКА КОНТРОЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ «СУХОЙ» ИММЕРСИИ НА ПАРАМЕТРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНО-МОТОРНОЙ ЗАДАЧИ

Миллер Н.В.¹, Зобова Л.Н.¹, Рощин В.Ю.^{1, 2}, Бадаква А.М.¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

E-mail: nvmler@mail.ru

В работе оценивается возможность использования контрольного тестирования, выполненного в условиях опоры, при исследовании влияния опорной разгрузки в условиях «сухой» иммерсии на характеристики управления джойстиком у человека при выполнении зрительно-моторной задачи.

Проведено сравнение параметров выполнения в течение 15 мин зрительно-моторной задачи у 14 женщин в 2 вариантах – лежа на кушетке и в иммерсионной ванне. Испытуемые переводили с помощью джойстика курсор из центра экрана на одну из 8 периферических мишеней, появляющихся в случайном порядке. Во время выполнения задачи регистрировались координаты положения курсора и сценарий предъявления мишеней, рассчитывались показатели, отражающие временные и геометрические параметры траекторий движения курсора из центра экрана к мишени. Сравнение было проведено по 4 характеристикам – латентному времени реакции, времени выполнения реакции, относительной длине траектории и параметру, характеризующему точность выполнения траектории, усредняемым как для каждой из мишеней, так и для всех мишеней вместе. Результаты исследования показали, что, несмотря на индивидуальные различия, для всей группы в целом все 4 параметра не различались достоверно ни по одной из мишеней, ни по их совокупности.

Результаты свидетельствуют о допустимости контрольных тестирований в условиях опоры при исследовании влияния длительной «сухой» иммерсии на планирование и контроль движения руки при управлении джойстиком у человека.

Ключевые слова: «сухая» иммерсия, опорная разгрузка, зрительно-моторная задача, управление движением, джойстик.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 88–93.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-88-93

Микрогравитация изменяет активность вестибулярной, опорной и проприоцептивной систем, взаимодействие которых, наряду со зрительной афферентацией, обеспечивает пространственную ориентацию, а также моторную и вегетативную

регуляцию [1–5]. Многочисленные исследования влияния гравитационной разгрузки на механизмы управления движениями, проведенные на человеке и животных в космических полетах (КП) и в наземных модельных экспериментах, показали изменение состояния сенсорных систем и их участия в обеспечении активности центральных нервных механизмов [5–8]. Такие изменения приводят к ухудшению моторного управления [9–14] и могут представлять значительные риски при выполнении операторской деятельности в КП. Расширение знаний о влиянии факторов КП на механизмы управления движениями является чрезвычайно важным, особенно с точки зрения перспективы длительных межпланетных полетов и создания профилактических средств. Наиболее адекватной моделью физиологических эффектов невесомости при изучении моторных механизмов является иммерсия [4, 6], при которой уменьшается приток опорной, тактильной и проприоцептивной афферентации в структуры центральной нервной системы, осуществляющие мультисенсорную конвергенцию афферентных сигналов различной сенсорной модальности [5, 7, 15].

Ранее в исследованиях на обезьянах [8] нами было показано, что после 3-часовой водной иммерсии не происходит заметного изменения функционального состояния нейронов представительства руки в первичной моторной коре у обезьян. Вместе с тем заметно ухудшаются паттерны движений курсора во время выполнения зрительно-двигательной задачи, заключающейся в его перемещения с помощью джойстика к появляющейся в случайном месте мишени, что свидетельствовало об изменении функционирования структур заднетеменной коры, участвующих в планировании и коррекции движений руки [16].

Для сравнения влияния сниженной опорной, тактильной и проприоцептивной афферентации на планирование и контроль движения руки при управлении джойстиком у человека и обезьяны при выполнении аналогичной зрительно-двигательной задачи было проведено исследование в условиях

7-суточной «сухой» иммерсии (СИ) с участием 12 испытуемых мужчин. Предварительный анализ полученных данных показал достоверное ухудшение характеристик движения курсора при выполнении задачи во время СИ с постепенным восстановлением к концу СИ и повторное ухудшение после СИ. Однако контрольное тестирование в этом исследовании проводилось в условиях опоры – в положении лежа на кушетке. Поэтому, учитывая разные условия тестирования (на кушетке и в ванне), возник вопрос об адекватности сравнения результатов, полученных в ходе СИ, с контрольными.

Цель исследования – сравнить влияние условий тестирования (на кушетке – в условиях опоры и в иммерсионной ванне – с кратковременной сниженной опорой) на временные и геометрические параметры выполнения зрительно-моторной задачи с помощью джойстика до начала СИ. Это позволит ответить на вопрос о допустимости контрольных тестирований в условиях опоры при исследовании влияния длительной опорной разгрузки на выполнение зрительно-двигательной задачи во время СИ.

Методика

Исследование проведено с участием 14 здоровых испытуемых женщин в возрасте от 23 до 40 лет ($28,9 \pm 5,1$ года) до начала 5-суточной СИ в рамках эксперимента на базе УНУ «Медико-технический комплекс для отработки инновационных технологий космической биомедицины в интересах обеспечения орбитальных и межпланетных полетов, а также развития практического здравоохранения» ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Программа эксперимента рассмотрена и одобрена на заседании Комиссии по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 615 от 06.06.2022 г.).

Одна из испытуемых была левой. Все выполняли предъявляемую задачу «рабочей» рукой. Исследования проводились в 2 вариантах: лежа на кушетке и в иммерсионной ванне (каждое в течение 15 мин). У всех испытуемых проведено по 6 тестирований – 3 раза через день по 2 тестирования (1 на кушетке, 1 в иммерсионной ванне). Сравнивали только последние тестирования, поскольку первые 2 отводились для тренировки навыка выполнения предъявляемой задачи.

В обоих случаях испытуемые находились в горизонтальном положении с приподнятой на подушке головой. На расстоянии 40 см от глаз устанавливали экран монитора с комфортным для работы наклоном. Под плечо рабочей руки подкладывали полумягкую подложку высотой 7 см. Джойстик закрепляли сбоку от экрана (со стороны «рабочей» руки) в положении, удобном для комфортной работы кистью при поднятом вверх предплечье (угол между плечом и предплечьем составлял приблизительно 90°).

На экране монитора предъявляли зрительно-двигательную задачу. Испытуемая должна была попасть курсором с помощью джойстика на периферическую мишень, предъявляемую в случайном порядке в одном из 8 фиксированных положений, лежащих на окружности с центром, совпадающим с центром экрана. После появления периферической мишени испытуемая должна была перевести курсор из центрального «стартового» круга внутрь периферической мишени и удерживать его там 300 мс, после чего изменялся цвет мишени, что означало правильное выполнение задачи. После возвращения курсора в центр экрана начинался следующий цикл предъявления мишени. На выполнение 1 цикла отводилось максимально 10 с. За 15 мин тестирования испытуемые выполняли не менее 250 циклов.

Во время выполнения задачи с частотой 25 Гц регистрировались координаты положения курсора и сценарий предъявления мишеней. По зарегистрированным данным рассчитывались показатели, отражающие временные и геометрические параметры траекторий движения курсора из центра экрана к мишени.

Программа обработки, написанная в среде MatLab, вычисляла параметры, усредненные ($M \pm sd$) для каждой из мишеней и для всех мишеней вместе за сеанс тестирования: время от предъявления мишени до выхода курсора из центрального круга – «латентное» время реакции ($T_{лат}$); время от выхода курсора из центрального круга до попадания его на мишень – время движения по траектории ($T_{тр}$); относительную длину траектории как отношение пути, пройденного курсором из центра экрана до касания мишени, к длине прямой линии, соединяющей эти точки ($L_{тр}$). Для характеристики точности движения курсора к мишени вычислялся косинус угла между текущим направлением движения курсора и текущим направлением на мишень с шагом в 40 мс. При текущем направлении движения курсора, перпендикулярном текущему направлению на мишень, значение косинуса равно нулю, а при совпадении направлений – единице, т. е. чем ближе показатель к 1, тем точнее движение курсора к мишени. Этот показатель также усреднялся для всех мишеней за сеанс тестирования ($\cos \alpha$). Достоверность анализируемых различий оценивали с помощью парного t-критерия Стьюдента для повторных измерений (с предварительной оценкой нормальности распределения), принимая критический уровень достоверности равным 0,05.

Результаты и обсуждение

Для оценки адекватности контрольного тестирования в условиях опоры (на кушетке) при изучении влияния СИ на выполнение зрительно-двигательной задачи с помощью джойстика проведено

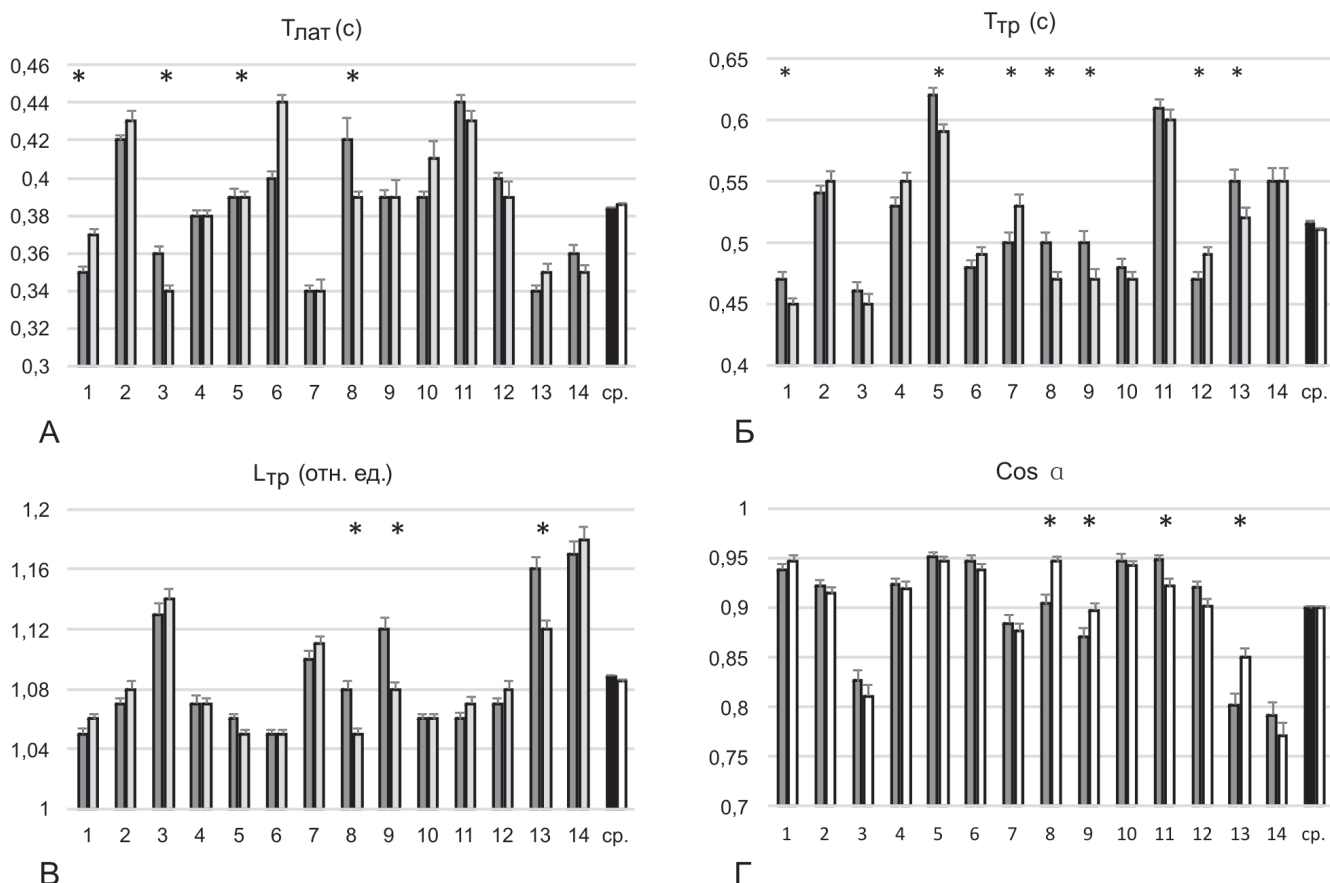


Рис. 1. Сравнение параметров траекторий, усредненных ($M \pm se$) по всем мишеням за весь сеанс тестирования, полученных в тестах, проведенных на кушетке (столбики темно-серого цвета – индивидуальные данные, черный – усредненные данные) и в иммерсионной ванне (столбики светло-серого цвета – индивидуальные данные, белый – усредненные данные).

А – «латентное» время реакции – $T_{лат}$; Б – время движения по траектории $T_{тр}$; В – относительная длина траектории $L_{тр}$; Г – характеристика точности движения курсора $\cos \alpha$. По оси абсцисс – номера испытуемых и усредненные данные; * – достоверные различия ($p < 0,01$)

сравнение параметров траекторий по 4 параметрам ($T_{лат}$, $T_{тр}$, $L_{тр}$, $\cos \alpha$), усредненным по всем мишеням за весь сеанс тестирования, полученных в тестах, проведенных на кушетке и в иммерсионной ванне. Сравнение проведено как для индивидуальных данных для каждой испытуемой, так и для данных, усредненных по всей группе.

На рис. 1 можно видеть довольно большие индивидуальные различия как в уровнях параметров, полученных при тестировании на кушетке (до 20,2 % отклонения от среднего для $T_{тр}$), так и в величине их изменений при изменении условия тестирования (до 14,7 % для $T_{лат}$). Для адекватного сравнения условий тестирования у всех испытуемых значения параметров, полученные в ванне, были пронормированы к значениям, полученным на кушетке, после чего усреднены и представлены в процентах на рис. 2. Как видно на рисунке, изменения всех усредненных параметров малы

($\Delta T_{лат} = 0,45$ %; $\Delta T_{тр} = -0,94$ %; $\Delta L_{тр} = -0,22$ %; $\Delta \cos \alpha = 0,04$ %) и недостоверны.

Известно, что из-за векторной природы силы тяжести движения рукой в разных направлениях не одинаковы и по временным характеристикам, и по точностным показателям. В условиях измененной гравитации, опорной и проприоцептивной депривации (как в КП, так и в модельных иммерсионных исследованиях) анизотропия движений руки меняется [14, 17]. Поэтому мы провели такое же сравнение исследуемых показателей траекторий движения курсора, управляемого джойстиком, для всех 8 мишеней по отдельности. Предварительно значения параметров, полученные за сеанс тестирования в ванне, были также пронормированы к значениям, полученным на кушетке, для каждой испытуемой, а затем усреднены и представлены в процентах по каждой из 8 мишеней. В результате мы увидели, что ни по одному направлению движения (ни к одной

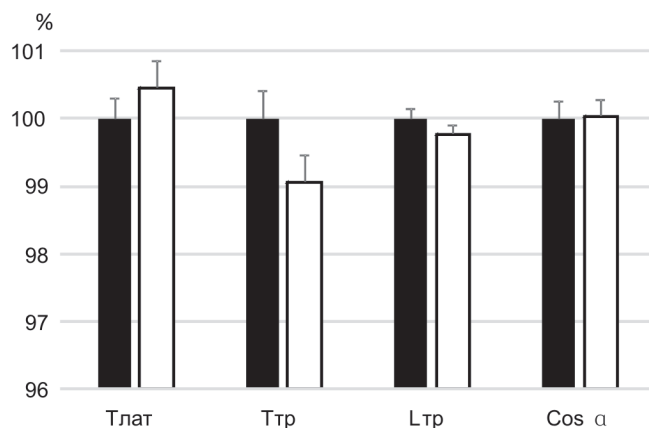


Рис. 2. Сравнение 4 параметров траекторий ($T_{лат}$, $T_{тр}$, $L_{тр}$, $\cos \alpha$), усредненных ($M \pm se$), по всем мишеням за весь сеанс тестирования для всех испытуемых.

Данные, полученные в иммерсионной ванне (столбики белого цвета), предварительно индивидуально пронормированы к данным, полученным в тестах, проведенных на кушетке (столбики черного цвета) и представлены в процентах

из мишеней) изменения всех 4 параметров не были достоверны (рис. 3).

Разные условия тестирования (в нашем случае опора и опорная разгрузка), несмотря на аналогичную задачу у одного и того же испытуемого, могут вызывать изменения исследуемых параметров. Можно было ожидать, что эти изменения будут сходны с теми, которые мы наблюдали в исследованиях на обезьянах [8, 16] при тестировании до и после 3-часового пребывания в иммерсионной ванне, когда показатели движения курсора из центра экрана к периферическим мишеням достоверно менялись. Однако данное исследование показало, что кратковременная (15-минутная) опорная разгрузка в иммерсионной ванне не вызывает достоверных изменений в параметрах выполнения зрительно-двигательной задачи, что свидетельствует о том, что такое время недостаточно для изменения функционирования структур заднетеменной коры, участвующих в планировании и коррекции движений руки. Поэтому ухудшение характеристик

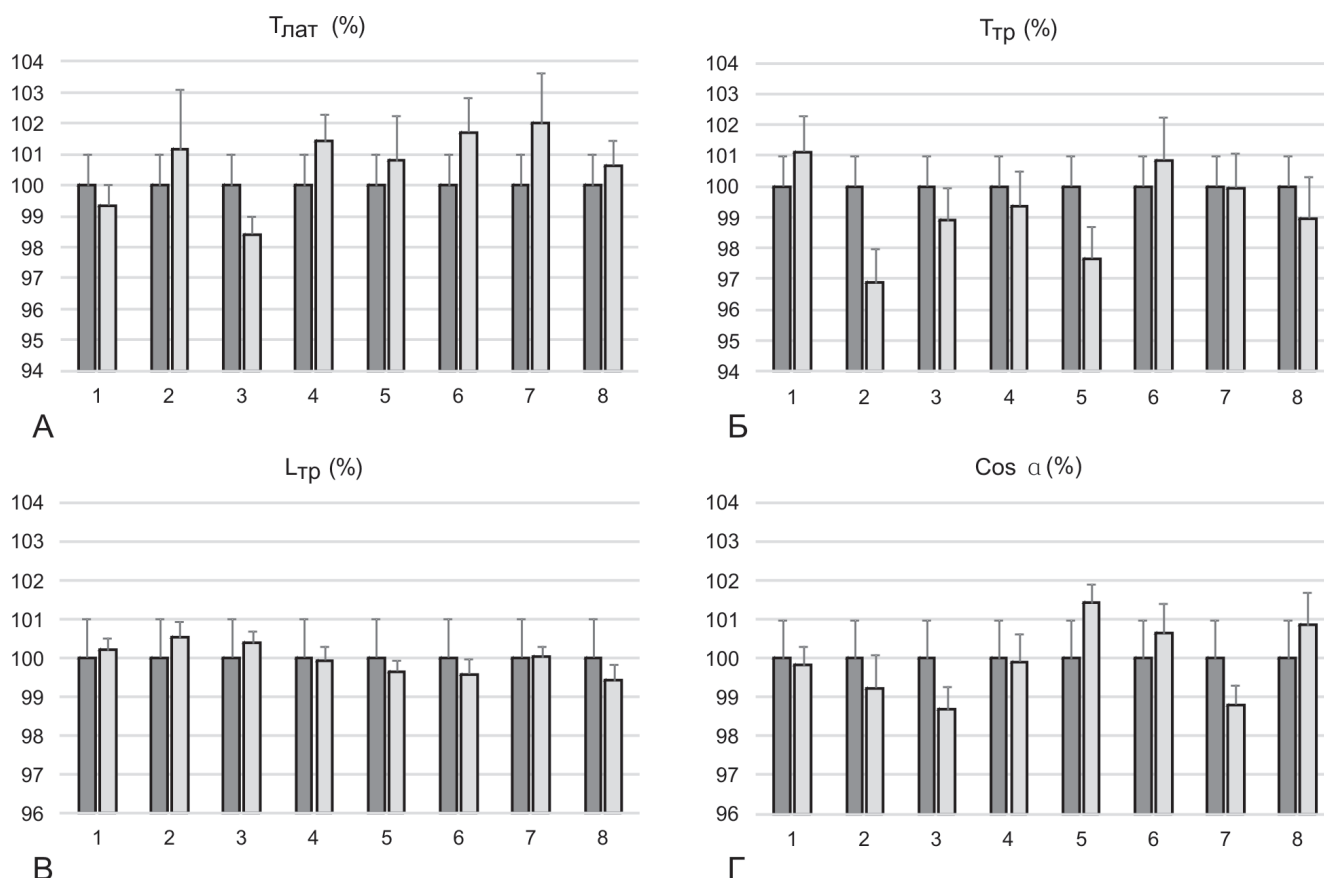


Рис. 3. Сравнение параметров траекторий, усредненных для всех испытуемых ($M \pm se$) к каждой из 8 мишеней за сеансы тестирования, проведенные на кушетке (столбики темно-серого цвета) и в иммерсионной ванне (столбики светло-серого цвета). Данные, полученные в иммерсионной ванне, представлены в процентах по отношению к данным, полученным в тестах, проведенных на кушетке.

А – «латентное» время реакции – $T_{лат}$; Б – время движения по траектории $T_{тр}$; В – относительная длина траектории $L_{тр}$; Г – характеристика точности движения курсора $\cos \alpha$. По оси абсцисс – номера мишеней

движения курсора при выполнении задачи во время 7-суточной СИ у 12 испытуемых мужчин, которое показал наш предварительный анализ, по всей видимости, связано с длительным воздействием иммерсии, а не с разными условиями тестирования до и во время СИ.

Выводы

На основании проведенного исследования можно утверждать, что при оценке влияния длительной опорной разгрузки во время СИ на изменения паттерна движения курсора при выполнении данной зрительно-двигательной задачи с помощью джойстика использование в качестве контроля результатов тестирования в условиях опоры (на кушетке) допустимо.

Авторы благодарят организаторов эксперимента «сухой» иммерсии» и женщин-добровольцев, участвовавших в этом эксперименте.

Работа выполнена при поддержке базовой темы РАН № 63.1.

Список литературы

1. Grigoriev A.I., Egorov A.D. Physiological aspects of adaptation of main human body systems during and after spaceflights // *Adv. in Space Biol. and Med.* 1992. V. 2. P. 43–82.
2. Reschke M.F., Jacob J., Bloomberg J.J. et al. Posture, locomotion, spatial orientation, and motion sickness as a function of space flight // *Brain Res. Rev.* 1998. V. 28. P.102–117
3. Корнилова Л.Н., Наумов И.А., Глухих Д.О. и др. Вестибулярная функция и космическая болезнь движения // *Физиология человека.* 2017. Т. 43. № 5. С. 80–93.
Kornilova L.N., Naumov I.A., Glukhikh D.O. et al. Vestibular function and space motion sickness // *Fiziologiya cheloveka.* 2017. V. 43. № 5. P. 80–93.
4. Козловская И.Б. Гравитация и тоническая постральная двигательная система // *Авиакосм. и экол. мед.* 2017. Т. 51. № 3. С. 5–21.
Kozlovskaya I.B. Gravity and the tonic postural motor system // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2017. V. 51. № 3. P. 5–21.
5. Van Omberger A., Demertzi A., Tomilovskaya E. et al. The effect of spaceflight and microgravity on the human brain // *J. Neurol.* 2017. V. 264. Suppl 1. P. 18–22.
6. Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al. Dry immersion as a ground-based model of microgravity physiological effects // *Front. in Physiol.* 2019. V. 10. Art. 284.
7. Gallagher M., Arshad I., Ferre E.R. Gravity modulates behaviour control strategy // *Exp. Brain Res.* 2019. V. 237. № 4. P. 989–994.
8. Бадаква А.М., Миллер Н.В., Зобова Л.Н., Рощин В.Ю. Исследование влияния опорной разгрузки на корковые механизмы управления движениями руки в иммерсионных экспериментах на обезьянах // *Авиакосм. и экол. мед.* 2019. Т. 53. № 3. С. 33–38.
Badakva A.M., Miller N.V., Zobova L.N., Roshchin V.Yu. Investigation of the effect of support unloading on the cortical mechanisms of controlling hand movements in immersion experiments on monkeys // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2019. V. 53. № 3. P. 33–38.
9. Berger M., Mescheriakov S., Molokanova E. et al. Pointing arm movements in short-and long-term spaceflights // *Aviat., Space, and Environ. Med.* 1997. V. 68. № 9. P. 781–787.
10. Mescheriakov S., Berger M., Molokanova E. et al. Slowing of human arm movements during weightlessness: the role of vision // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. № 6. P. 576–583.
11. Weber B., Panzirsch M., Stulp F., Schneider S. Sensorimotor performance and haptic support in simulated weightlessness // *Exp. Brain Res.* 2020. V. 238. № 10. P. 2373–2384.
12. Weber B., Riecke C., Stulp F. Sensorimotor impairment and haptic support in microgravity // *Exp. Brain Res.* 2021. V. 239. № 3. P. 967–981
13. Weber B., Proske U. Limb position sense and sensorimotor performance under conditions of weightlessness // *Life Sci. in Space Res.* 2022. V. 32. P. 63–69.
14. Ляховецкий В.А., Зеленская И.С., Карпинская В.Ю. и др. Влияние «сухой» иммерсии на характеристики циклических точностных движений руки // *Физиология человека.* 2022. Т. 48. № 6. С. 57–64.
Lyakhovetskiy V.A., Zelenskaya I.S., Karpinskaya V.Yu. et al. The effect of dry immersion on the characteristics of cyclic precision hand movements // *Fiziologiya cheloveka.* 2022. V. 48. № 6. P. 57–48.
15. Koppelmans V., Bloomberg J.J., Mulavara A.P., Seidler R.D. Brain structural plasticity with spaceflight // *NPJ Micrograv.* 2016. V. 2. Art. 2. P. 1–8.
16. Бадаква А.М., Миллер Н.В., Зобова Л.Н., Рощин В.Ю. Влияние водной иммерсии обезьян на активность структур заднетеменной коры, участвующих в планировании и коррекции движений руки при выполнении моторной задачи // *Физиология человека.* 2021. Т. 47. № 3. С. 13–19.
Badakva A.M., Miller N.V., Zobova L.N., Roshchin V.Yu. The influence of water immersion of monkeys on the activity of posterior-parietal cortex structures involved in planning and correcting hand movements when performing a motor task // *Fiziologiya cheloveka.* 2021. V. 47. № 3. P. 13–19.
17. Papaxanthis C., Pozzo T., McIntyre J. Kinematic and dynamic processes for the control of pointing movements in humans revealed by short-term exposure to microgravity // *Neurosci.* 2005. V. 135. № 2. V. 371–383.

Поступила 09.02.2023

PROCEDURE OF CHECK TESTING IN THE PROCESS OF STUDYING THE EFFECTS OF DRY IMMERSION ON CHARACTERISTICS OF PERFORMING A MOTOR-OCULAR TASK

Miller N.V.¹, Zobova L.N.¹, Roshchin V.Yu.^{1, 2}, Badakva A.M.¹

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Effects of reduced support, tactile and proprioceptive afferentation on mapping and manual operating the joystick were evaluated with participation of 14 female subjects. The idea was to compare performance of a 15 minute motor-ocular task in the conditions of dry immersion and lying supine on a couch.

The subjects were to direct the pointer from the screen center to one of 8 randomly emerging targets. Pointer coordinates and emergence scenarios were registered; time to reach the target and geometry of pointer trajectories were calculated. Comparison was made by 4 characteristics: latent time of reaction, time of implementing the reaction, relative trajectory length, and averaged precision of trajectory to a target and the sum of trajectories. It was found that despite some individual differences, for all participants these 4 characteristics, equally of moving to a specific target or the sum of targets, were essentially similar.

The results attest to the applicability of testing supine subject's manual tracking of the pointer to a target as a baseline data collection in dry immersion experiments aimed to define whether support-deprivation impacts effectiveness of manual moving the pointer to target.

Key words: dry immersion, support deprivation, motor-ocular task, movement control, joystick.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 88–93.

УДК 57.083.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПРИЕМА АУТОПРОБИОТИКА НА ОСНОВЕ *STREPTOCOCCUS SALIVARIUS* НА СОСТОЯНИЕ МИКРОБИОТЫ ПОЛОСТИ РТА У УЧАСТНИКОВ ИЗОЛЯЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА SIRIUS-2021

Ильин В.К.¹, Соловьёва З.О.¹, Носовский А.М.¹, Рыкова М.П.¹, Шеблаева А.С.¹,
Шеблаев М.В.², Ловцевич С.М.³, Краева Л.А.⁴, Гизингер О.А.⁵

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³ООО «Институт аналитической токсикологии», Москва

⁴Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера

⁵Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Медицинский институт, Москва

E-mail: anna@sheblaeva.ru

Проведено исследование влияния аутологичного препарата на основе *Streptococcus salivarius* (*S. salivarius*) на состояние микробиоты полости рта у участников 8-месячного изоляционного эксперимента SIRIUS-2021 для создания программ профилактики и предотвращения у них иммуномикробиологических нарушений.

Исследовали динамику качественного и количественного состава микробиоты полости рта, определяли микробиологические изменения до и после приема аутологичного препарата *S. salivarius* с применением бактериологического метода, масс-спектрометрического анализа MALDI-TOF, метода масс-спектрометрии микробных маркеров. Концентрацию секреторного иммуноглобулина А (sIgA) и цитокинов класса IL-8, IL-10 в ротовой жидкости у испытуемых устанавливали методом иммуоферментативного анализа.

Показано, что аутологичный препарат на основе *S. salivarius* благотворно влияет на микробиоценоз полости рта у всех участников эксперимента.

Ключевые слова: пародонт, ротоглотка, масс-спектрометрия микробных маркеров, MALDI-TOF анализ, иммуоферментный анализ, бактериологический метод.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 94–101.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-94-101

Проблема микробной обсемененности человека, находящегося в условиях космического полета, а также в других объектах герметично замкнутого пространства является весьма актуальной. Во время космической миссии члены экипажа постоянно подвергаются различным стрессовым факторам в виде повышенного психоэмоционального напряжения, радиации, искусственной среды обитания, перегрузки (на этапе вывода космического корабля на орбиту и при посадке), гиподинамии, микрогравитации, влияющих на иммунную, костную, кроветворную и другие функции [1–3].

В течение всего полета экипаж находится в герметично замкнутом пространстве, где члены команды постоянно обмениваются микробиотой воздушно-капельным путем. Накопление и увеличение микробной обсемененности воздушного пространства внутри корабля может приводить к повышению вирулентности ранее не патогенных микробов, что в свою очередь ведет к дисбиотическим состояниям и воспалительным заболеваниям полости рта, поражению пародонта [4–7]. Нарушение колонизационной резистентности вследствие повреждения защитных механизмов или нормальной микробиоты приводит к дисбиозу, причем как отдельно в зеве, так и на поверхности миндалин, слизистой оболочке полости носа и носовых пазух [8].

Пародонт (комплекс тканей, окружающих зуб) состоит из десны (прикрепленной и неприкрепленной), альвеолярного отростка (включающего надкостницу) и периодонта. Между слюной, поверхностью слизистой оболочки и десной идет постоянная трансмиссивная передача электролитов, антибактериальных веществ, иммуноглобулинов и др. Изменение физико-химических свойств десневой жидкости приводит к воспалительным реакциям в тканях пародонта, что может приводить к нарушению прилегания десны к зубу и образованию патологического очага воспаления в области десневого кармана с последующей деструкцией костной ткани [9–11].

К пародонтопатогенам ротовой полости относятся более 20 видов бактерий разной степени вирулентности. Преобладающими являются следующие условно-патогенные микроорганизмы: *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*, *Fusobacterium nucleatum*, *Prevotella intermedia*, *Treponema denticola*, *Porphyromonas gingivalis*, *Actinomyces* spp., *Candida* spp., *Streptococcus sanguis*, *Streptococcus mutans*,

Peptostreptococcus anaerobius, *Corynebacterium spp.*, *Fusobacterium spp.*, *Propionibacterium spp.*, *Prevotella spp.*, *Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*, *Actinomyces viscosus*, *Peptostreptococcus anaerobius*, *Candida glabrata* [12].

Для решения вопроса поддержания физиологических реакций местной антимикробной защиты испытуемых было принято решение о приеме аутопробиотика на основе *Streptococcus salivarius* (*S. salivarius*). Ранее проведенные исследования [13, 14] показали, что аутологичные бактерии, выделенные непосредственно от реципиента, благотворно влияют на поддержание микроэкологии слизистых оболочек, поскольку степень их родства к клеткам слизистых организма человека значительно выше, чем у пробиотических промышленных штаммов.

Анализ эффективности диагностических методов дал основание использовать в исследовании бактериологический метод (БАК), масс-спектрометрический анализ MALDI-TOF и сравнительно новый метод масс-спектрометрии микробных маркеров (МСММ), а также лабораторный иммунологический метод количественного определения различных низкомолекулярных соединений – иммуноферментный анализ (ИФА).

Метод МСММ имеет высокую чувствительность, специфичность и ранее доказал свою эффективность в различных направлениях клинической медицины, в области исследования микробиоты полости рта [15–20].

Цель данного исследования – получение данных о влиянии аутологичного препарата на основе *S. salivarius* на состояние микробиоты полости рта у участников изоляционного эксперимента SIRIUS-2021.

Методика

Исследование проведено на базе ИМБП РАН, рассмотрено и одобрено Комиссией по биоэтике ИМБП РАН (протокол № 539 от 17 марта 2020 г.). Все участники эксперимента дали Информированное согласие на участие в нем. В ходе эксперимента 5 разнополых испытуемых добровольцев в возрасте от 30 до 46 лет в рамках международной программы SIRIUS-2021 в течение 8 мес находились в замкнутом герметичном пространстве, имитирующем капсулу космического корабля. Взятие проб проводилось за 14 дней до начала эксперимента, во время эксперимента на 30, 60, 90, 120, 150, 160, 180, 210, 240-е сутки. За месяц до входа в эксперимент участники программы сдавали слюну для получения аутопробиотического препарата *S. salivarius*. Слюну собирали натошак в стерильный контейнер и в течение 5 ч доставляли в условиях термоизоляции в лабораторию Санкт-Петербургского НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера для

выращивания культуры. Посев слюны осуществляли по методу Голда в 2 повторностях на колумбийский агар с бараньей кровью, желточно-солевой агар, агар Сабуро, агар Шедлера. Посевы помещали в термостат на 37 °С (в аэробных и анаэробных условиях). Через 24 ч посевы просматривали под микроскопом при увеличении в 20 раз и отсеивали единичные колонии для получения «чистой» культуры. На следующий день делали мазки из выросших культур, окрашивали по Граму и микроскопировали при увеличении в 1000 раз. Полученные «чистые» культуры идентифицировали с помощью масс-спектрометрического анализа MALDI-TOF. Спектры собирались в автоматическом режиме на масс-спектрометре Microflex™ LT MALDI-TOF (Bruker Daltonics, Германия). Подтвержденные штаммы *S. salivarius* для каждого члена экипажа наращивали в достаточном количестве на чашках Петри с колумбийским агаром, производя посев «газонным» методом. Полученную биомассу смывали раствором для лиофилизации, достигая концентрации бактерий $1 \cdot 10^9$ [КОЕ/мл], аликвотировали по 1 мл во флаконы, производили лиофильную сушку, флаконы завальцовывали. Для каждого реципиента пробиотического препарата *S. salivarius* было подготовлено достаточное количество одноразовых флаконов, содержащих по 1 мл лиофилизата собственных бактерий *S. salivarius*, необходимых на 1 прием. На 150-е сутки пребывания в герметично замкнутом пространстве опытная группа (5 человек) принимала лиофилизированный аутопробиотик на основе *S. salivarius* 1 раз в день утром натошак, разбавляя препарат дистиллированной водой. Прием лиофилизата продолжался в течение 2 нед.

Взятие проб ротовой жидкости проводилось утром натошак самостоятельно участниками исследования, ранее обученными процедуре, с использованием стерильных ватных тампонов, которые прикладывались с наружной поверхности зубов в области резцов на верхней и нижней челюсти на протяжении 2 мин. Данная методика была успешно применена и показала свою валидность при определении иммуноглобулинов в ротовой жидкости космонавтов непосредственно в условиях длительного космического полета [7]. Пробы слюны отбирались в стерильную трубу в течение 2 мин. Также в ходе исследования были взяты и мазки в области зева, для чего перед отбором материала эта область протиралась 3–4 раза с применением стерильного ватного тампона, затем биоматериал помещался в закрытую стерильную трубу. Образцы слюны и мазки из зева, замораживались при температуре -20 °С с последующей транспортировкой в лабораторию и идентифицированием на аппарате для исследования МСММ «МАЭСТРО» (ООО «Интерлаб», Россия). Для проведения бактериологического исследования взятие проб проводилось с помощью

стерильной ватной турунды, тампоном протиралась область десны и десневых карманов. Манипуляции проводились на нижних молярах со щечной и язычной стороны. Полученные пробы помещались в стерильную тубу.

После взятия проб проводилась микробиологическая и иммунологическая оценка гуморальных факторов с использованием БАК-анализа, MALDI-TOF-анализа, метода МСММ и ИФА-анализа. Концентрация секреторного иммуноглобулина А (sIgA) и цитокинов класса IL-8, IL-10 в ротовой жидкости у испытуемых определялась методом ИФА с помощью наборов реагентов ЗАО «Вектор – Бест» (Россия). Анализ и интерпретацию результатов исследования методом МСММ проводили в строгом соответствии с зарегистрированной медицинской технологией [19].

Для проведения бактериологического исследования пробы высевались на следующих питательных средах с инкубацией 48 ч при 37 °С:

- кровяной агар (для определения общего микробного числа);
- агар Эндо (для количественной оценки роста грамотрицательных палочек);
- маннитол – солевой агар (для количественной оценки роста стафилококков);
- агар Сабуро (для количественной оценки роста дрожжей и дрожжеподобных клеток).

Обработка статистического материала данных участников до и после приема аутопробиотика *S. salivarius* сделана с использованием статистического пакета Statistica 13.5, применения непараметрического критерия Вилкоксона, уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа проб слюны и мазков из зева методом МСММ представлены на рис. 1, 2. Уровень микробной обсемененности пародонтопатогенов в

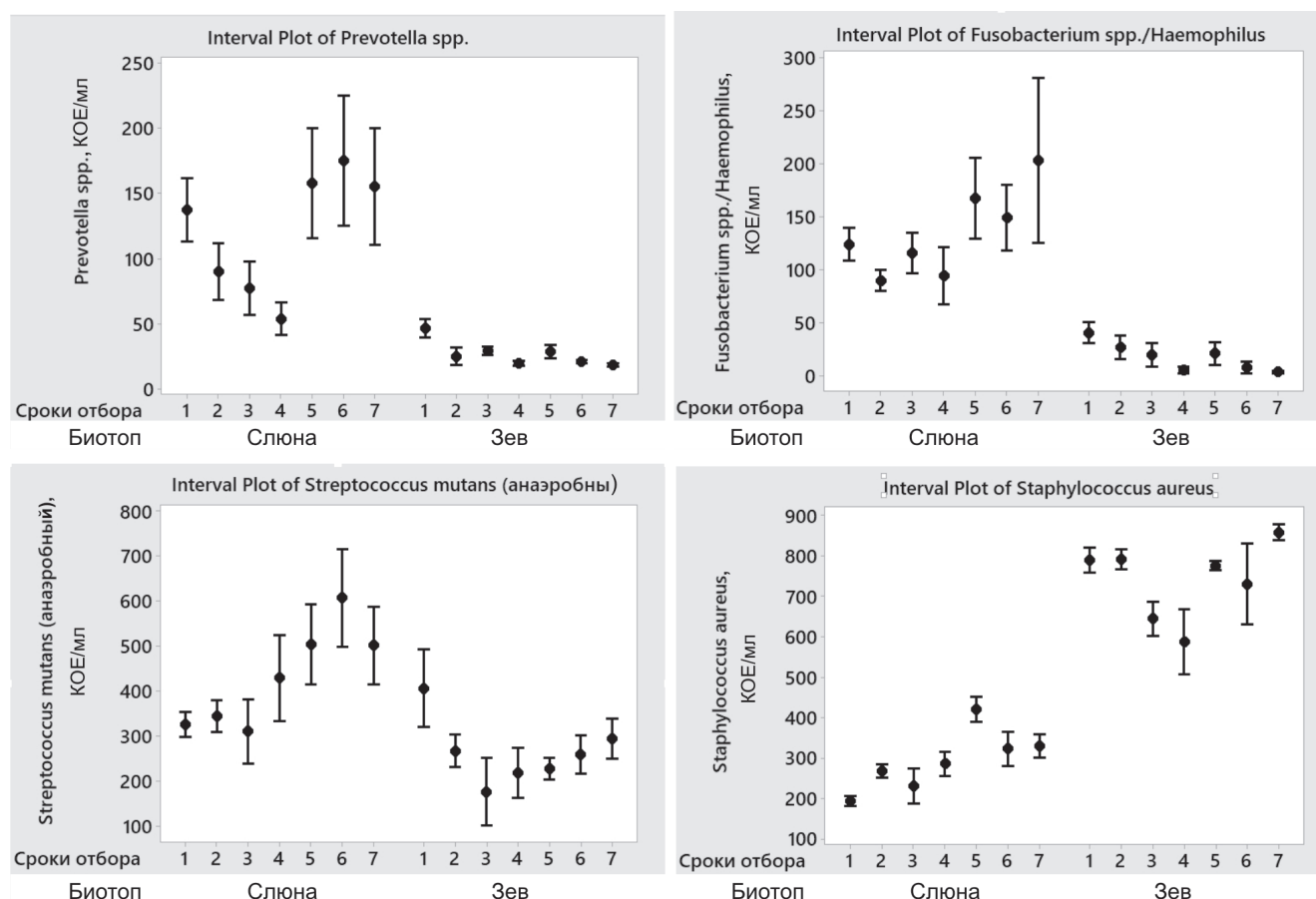


Рис. 1. Определение методом МСММ концентрации *Streptococcus mutans*, *Staphylococcus aureus*, *Fusobacterium spp.*, *Prevotella spp.* в слюне и зеве.

По горизонтали биотопы и сроки отбора проб. По вертикальной оси уровень содержания – 1 *Streptococcus mutans*, *Staphylococcus aureus*, *Fusobacterium spp.*, *Prevotella spp.* [КОЕ/мл].

Здесь и на рис. 2: сроки отбора проб: 1 – 14 сут от входа в эксперимент; 2 – 30 сут от входа в эксперимент; 3 – 60 сут от входа в эксперимент; 4 – 120 сут от входа в эксперимент; 5 – 150 сут от входа в эксперимент; 6 – 160 сут от входа в эксперимент; 7 – 210 сут от входа в эксперимент; $p < 0,05$

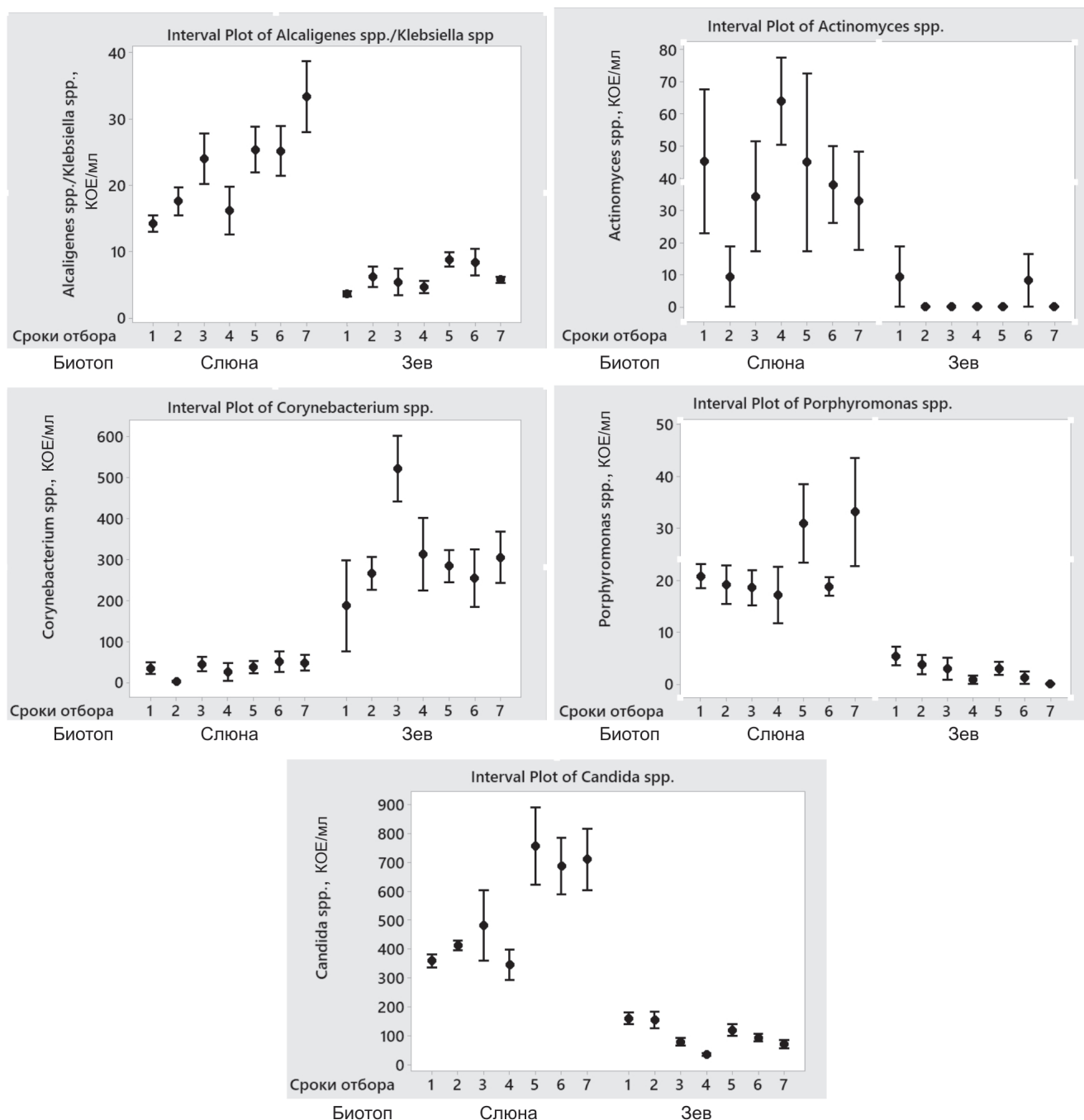


Рис. 2. Определение методом МСММ концентрации *Actinomyces spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Klebsiella spp.*, *Porphyromonas spp.*, *Candida spp.* в слюне и зеве. По горизонтали биотопы и сроки отбора проб. По вертикальной оси уровень содержания – *Actinomyces spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Klebsiella spp.*, *Porphyromonas spp.*, *Candida spp.* [КОЕ/мл]

пробах слюны изначально был достоверно выше, чем в мазках из зева, за исключением *Corynebacterium spp.* и *Staphylococcus aureus*. Наблюдалось достоверное увеличение уровня микробной обсемененности в пробах слюны таких пародонтопатогенов, как *Streptococcus mutans*, *Staphylococcus aureus*, *Fusobacterium spp.*, *Prevotella spp.*, *Klebsiella spp.*, *Porphyromonas spp.*, *Candida spp.* у участников

исследования на выходе из эксперимента по сравнению с фоновыми значениями или 30-ми сутками эксперимента, кроме показателей *Actinomyces spp.* (см. рис. 1, 2).

В свою очередь, достоверное увеличение уровня микробной обсемененности пародонтопатогенов в пробах мазков из зева на выходе из эксперимента по сравнению с фоновыми значениями было

лишь у *Klebsiella spp.*, *Staphylococcus aureus* (см. рис. 1, 2). Уже на 30-е сутки отмечалось достоверное увеличение уровня микробной обсемененности в пробах слюны таких пародонтопатогенов, как *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella spp.*, *Candida spp.* (см. рис. 1, 2). В пробах же, взятых со слизистых зева на 30 сутки эксперимента, наблюдалось достоверное увеличение уровня микробной обсемененности лишь у *Klebsiella spp.*, *Corynebacterium spp.* (см. рис. 2), что может свидетельствовать о наличии устойчивых протективных механизмов в области зева по отношению к антигенной нагрузке [8].

Слюна, как постоянно меняющаяся среда, первой отвечает на изменения в полости рта, тем самым процессы накопления патогенной микрофлоры в ней видны ярче. К 150-м суткам эксперимента (начало приема аутопробиотика) наблюдалась тенденция увеличения уровня микробной обсемененности пародонтопатогенов в слюне и зеве, кроме *Actinomyces spp.*, что указывает на накопление условно-патогенной микрофлоры к этому моменту. Дальнейший анализ показал снижение уровня микробной обсемененности *Fusobacterium spp.*, *Staphylococcus aureus*, *Candida spp.*, *Porphyromonas spp.* на 160-е сутки эксперимента (10 сут после приема аутопробиотического препарата), либо его стабилизацию (*Klebsiella spp.*, *Corynebacterium spp.*) (см. рис. 1, 2).

С использованием бактериологического метода у участников исследования были высеваны условные патогены ротовой полости: *Streptococcus spp.*, *Staphylococcus aureus*, протективная группа бактерий *Enterococcus spp.* На 60-е сутки эксперимента уровень микробной обсемененности *Enterococcus spp.* у 2-го участника не превышал нормы (10^4 [КОЕ/мл]), а у 3-го норма была превышена до значения 10^6 [КОЕ/мл]. На 90-е сутки эксперимента отмечен рост уровня микробной обсемененности условно-патогенной микрофлоры *Streptococcus spp.* у всех участников и *Staphylococcus aureus* у 4-го участника, но показатели нормы (10^4 [КОЕ/мл]) не превышены. К 120-м суткам эксперимента происходил дальнейший рост уровня микробной обсемененности *Streptococcus spp.* у 1-го и 5-го участников и *Staphylococcus aureus* у 4-го участника в пределах нормы. К началу приема аутопробиотического препарата (150-е сутки) у всех участников эксперимента присутствовали изучаемые микроорганизмы в пределах нормы, только у 1 участника *Enterococcus spp.* содержались в количестве 10^5 [КОЕ/мл]. На 180-е сутки (конец приема аутопробиотического препарата) у всех участников отсутствовал *Staphylococcus aureus*. У 3-го, 4-го, 5-го участников значения протективной группы *Enterococcus spp.* повысились соответственно до 10^3 , 10^5 , 10^6 [КОЕ/мл] по сравнению со 150-ми сутками. Уровень микробной обсемененности *Streptococcus spp.* у всех участников не превышал пределов нормы. На 210-е сутки и

240-е сутки у всех участников эксперимента уровень микробной обсемененности *Streptococcus spp.*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus spp.* не превышал нормальных значений.

Сравнивая данные до и после приема аутопробиотика на основе *S. salivarius*, были отмечены статистически достоверные изменения ($p < 0,05$) следующих условных-патогенов в слюне: *Staphylococcus aureus*, *Prevotella spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Klebsiella spp.*; в зеве – лишь *Klebsiella spp.*, что может быть связано с буферными свойствами слюны, постоянно меняющейся по отношению к внешним и внутренним факторам, быстрее реагирующей на аутопробиотик, а также наличием собственной протективной микрофлоры в области зева, так называемого «кольца Пирогова».

Результаты анализа содержания в пробах ротовой жидкости секреторного иммуноглобулина А (sIgA) и цитокинов IL-8, IL-10 представлены на рис. 3.

Наблюдалась тенденция периодического увеличения содержания sIgA, IL-8, IL-10 в ротовой жидкости у испытуемых. Так, например, на 30-е сутки эксперимента отмечалась тенденция увеличения sIgA и IL-8 (провоспалительный цитокин), а также достоверного снижения IL-10 (противовоспалительный цитокин) по сравнению с фоновыми значениями. Полученные в исследовании результаты согласуются с полученными ранее данными исследований, свидетельствующих о том, что активация пародонтопатогенными микробами моноцитов и макрофагов на уровне зубодесневого соединения увеличивает продукцию этими клетками провоспалительных цитокинов, вызывая дисбаланс между их про- и противовоспалительным пулами. Дисбаланс между про- и противовоспалительным пулами цитокинов может быть следствием неадекватного локального иммунного ответа на микрофлору [5]. К 160-м суткам эксперимента наблюдалось достоверное снижение sIgA, IL-8, IL-10 по сравнению с фоновыми значениями. Спустя 2 нед после окончания приема аутопробиотика (180-е сутки эксперимента) отмечалась тенденция к увеличению содержания в пробах ротовой жидкости sIgA, IL-8, IL-10, с последующим достоверным увеличением содержания IL-10 к 240-м суткам эксперимента.

Выводы

1. В условиях измененной среды обитания выявлены нарушения факторов барьерной функции организма: содержание протективной микрофлоры, состояние эпителия покровных тканей и слизистых, факторы гуморального иммунитета. При дисбиотических нарушениях, связанных с условиями длительной изоляции, наблюдалось повышение содержания в ротовой жидкости как провоспалительного (IL-8), так и противовоспалительного (IL-10)

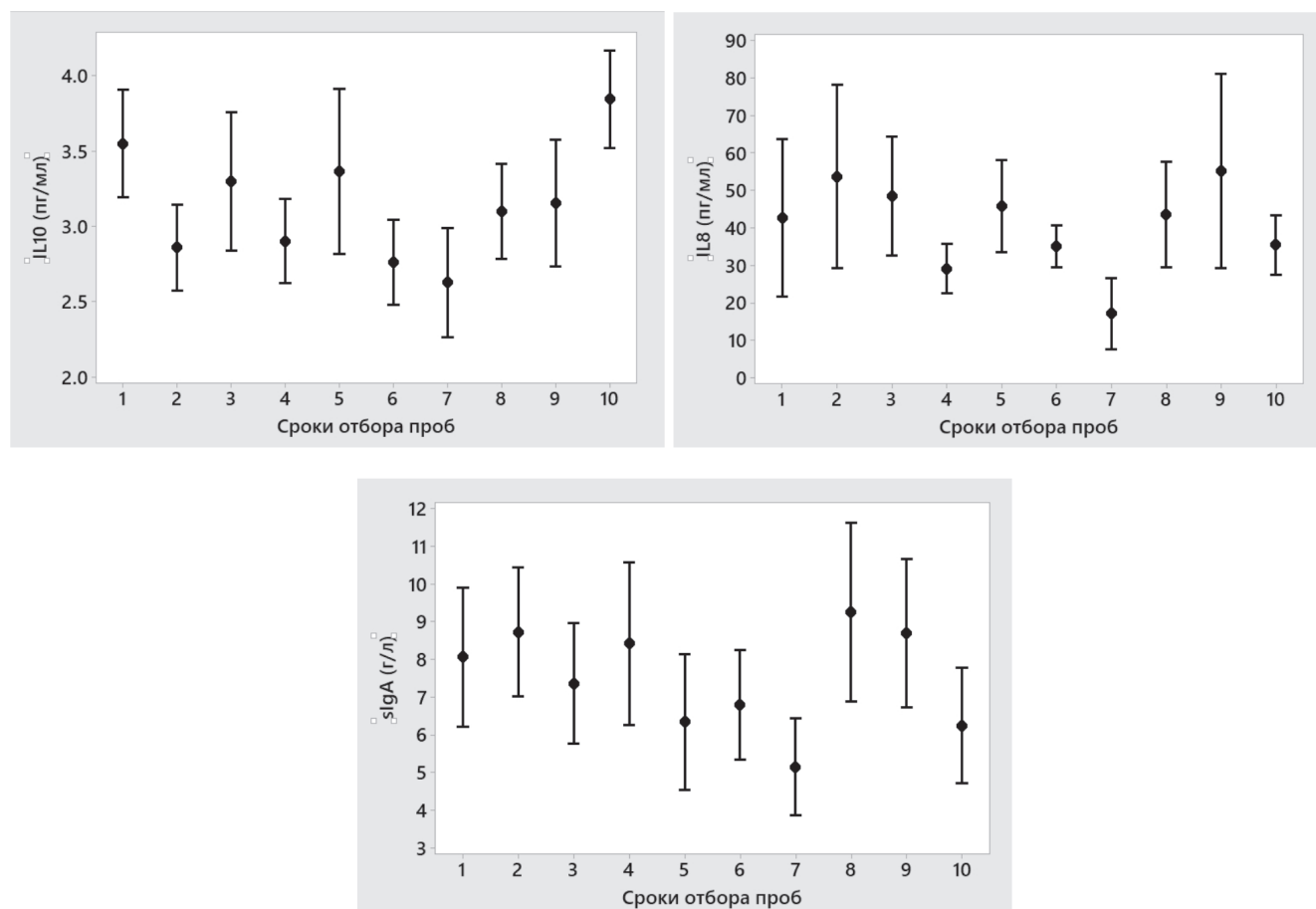


Рис. 3. Содержание иммуноглобулина класса sIgA [г/л] и цитокинов класса IL-8, IL-10 [пг/мл] в ротовой жидкости у испытуемых, находившихся в условиях изоляционного эксперимента.

По горизонтальной оси – сроки отбора проб. По вертикальной оси – уровень содержания sIgA [г/л] и уровень содержания IL-8, IL-10 [пг/мл].

Сроки отбора проб: 1 – 14-е сутки; 2 – 30-е сутки; 3 – 60-е сутки; 4 – 90-е сутки; 5 – 120-е сутки; 6 – 150-е сутки; 7 – 160-е сутки; 8 – 180-е сутки; 9 – 210-е сутки; 10 – 240-е сутки; $p < 0,05$

медиатора, что свидетельствует об активации иммунитета слизистой оболочки ротовой полости.

2. Содержание секреторного иммуноглобулина sIgA, являющегося иммунным ответом слизистых ротовой полости, постепенно снижалось вплоть до 160-х суток, а после приема аутопробиотического препарата увеличивалось до значений выше фоновых.

3. В работе разными диагностическими методами показано, что имеется характерная тенденция периодического роста и накопления условно-патогенной микробиоты полости рта в условиях измененной среды обитания и что при росте патогенной микробиоты идет подавление протективной микрофлоры и наоборот.

4. Пробиотик на основе *S. salivarius* показал восстановление иммунных процессов области пародонта и слюны по сравнению с показаниями слизистой оболочки зева, что может свидетельствовать

о его стабилизирующем потенциале к воздействию на микробиоценозы в составе биопленки.

5. Аутологичный препарат на основе *S. salivarius* благотворно влияет на микробиоценоз полости рта у всех участников эксперимента и имеет тенденцию к накопительному эффекту. Данный препарат является эффективным и может быть рекомендован к применению для повышения колонизационной резистентности слизистых оболочек ротовой полости.

Работа выполнена в рамках темы № 64.2 ФНИ РАН.

Список литературы

1. Baevsky R.M., Chernikova A.G., Funtova I.I., Tank J. Assessment of individual adaptation to microgravity during long term space flight based on stepwise discriminant analysis

of heart rate variability parameters // *Acta Astronaut.* 2011. V. 69. № 11–12. P. 1148–1152.

2. Оганов В.С. и др. Изменения костной ткани человека в космическом полете I. Феноменология // *Остеопороз и остеопатии.* 2004. № 3. С. 2–5.

Oganov V.S. et al. Changes in human bone tissue during space flight I. Phenomenology // *Osteoporoz i osteopatii.* 2004. № 3. P. 2–5.

3. Носков В.Б. Перераспределение жидких сред организма в условиях невесомости и моделирующих ее воздействий // *Авиакосм. и экол. мед.* 2011. Т. 45. № 1. С. 17–26.

Noskov V.B. Redistribution of body liquids in the conditions of microgravity and simulation of its effects // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2011. V. 45. № 1. P. 17–26.

4. Ильин В.К. и др. Факторы микробиологического риска и обоснование подходов к обеспечению противоинфекционной безопасности экипажей межпланетных космических полетов и лунных баз // *Авиакосм. и экол. мед.* 2018. Т. 52. № 6. С. 7–18.

Ilyin V.K. et al. Factors of microbiological risk and substantiation of approaches to ensuring anti-infective safety of crews of interplanetary space flights and lunar bases // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2018. V. 52. № 6. P. 7–18.

5. Ильин В.К., Воложин А.И., Виха Г.В. Колонизационная резистентность организма в измененной среде обитания. М., 2005.

Ilyin V.K., Volozhin A.I., Vikha G.V. Colonization resistance of the organism in the changed habitats. Moscow, 2005.

6. Шумилина Г.А., Зарубина К.В. Оценка функционального состояния полости рта космонавтов в условиях космического полета // *Космическая биология и авиакосмическая медицина: Матер. XII конф.* М., 2002. С. 361–362.

Shumilina G.A., Zarubina K.V. Evaluation of the functional state of the oral cavity of astronauts in space flight conditions // *Space Biology and Aerospace Medicine: Materials of the XII conference.* Moscow, 2002. P. 361–362.

7. Ильин В.К., Шумилина Г.А., Соловьёва З.О. Исследование состояния полости рта и зубов космонавтов при полетах на МКС (Космический эксперимент «Пародонт-2») [Электронный ресурс]. М., 2016. URL: <http://inno.imbp.ru/publication.html#2>.

Ilyin V.K., Shumilina G.A., Solovyova Z.O. Investigation of the condition of the oral cavity and teeth of astronauts during flights to the ISS (Space experiment Periodontal-2). [Electronic Resource]. Moscow, 2016. URL: <http://inno.imbp.ru/publication.html#2>.

8. Гизингер О.А. Использование гипертонического раствора морской воды с экстрактом бурых водорослей *Ascophillum nodosum* в терапии острого риносинусита // *Российский вестник перинатологии и педиатрии.* 2020. Т. 65. № 2. С. 133–140.

Gizinger O.A. The use of a hypertonic solution of sea water with an extract of brown algae *Ascophillum nodosum*

in the treatment of acute rhinosinusitis // *Rossiyskiy Vestnik Perinatologii i Pediatrii.* 2020. V. 65. № 2. P. 133–140.

9. Кулаков А.А., Зорина О.А., Борискина О.А. Роль защитных факторов организма в патогенезе воспалительных заболеваний пародонта // *Стоматология.* 2010. № 6. С. 72–76.

Kulakov A.A., Zorina O.A., Boriskina O.A. The role of protective factors of the body in the pathogenesis of inflammatory periodontal diseases // *Stomatologiya.* 2010. № 6. P. 72–76.

10. Hutcherson J.A., Bagaitkar J., Nagano K. et al. Porphyromonasgingivalis Rag B is a proinflammatory signal transducer and activator of transcription 4 agonist // *Mol. Oral. Microbiol.* 2015. V. 30. № 3. P. 242–252.

11. Зорина О.А. Взаимосвязь качественного и количественного состава биоценозов ротовой полости и индивидуального генетического профиля на фоне воспалительных заболеваний пародонта: Дис. ... докт. мед. наук. М., 2011.

Zorina O.A. Relationship between the qualitative and quantitative composition of oral cavity biocenoses and individual genetic profile against the background of inflammatory periodontal diseases: Dissertatsiya ... doktora meditsinskikh nauk. Moscow, 2011.

12. Khor B., Snow M., Herrman E. et al. Interconnections between the oral and gut microbiomes: reversal of microbial dysbiosis and the balance between systemic health and disease // *Microorganisms.* 2021. V. 9. № 3. P. 496.

13. Шендеров Б.А. Функциональное питание, криогенные банки микробиоценозов и их роль в сохранении и восстановлении здоровья // *Вестник восстановительной медицины.* 2003. № 1. С. 29–31.

Shenderov B.A. Functional nutrition, cryogenic banks of microbiocenoses and their role in maintaining and restoring health // *Vestnik Vosstanovitel'noy Meditsiny.* 2003. № 1. P. 29–31.

14. Ван Ликуй Использование пробиотиков и аутоштаммов лактобактерий в комплексном лечении бактериального вагиноза: Дис. ... канд. мед. наук. М., 2006.

Wang Likui The use of probiotics and autostrains of lactobacilli in the complex treatment of bacterial vaginosis: Dissertatsiya ... kandidata meditsinskikh nauk. Moscow, 2006.

15. Осипов Г.А., Родионов Г.Г. Применение метода масс-спектрометрии микробных маркеров в клинической практике // *Поликлиника.* 2013. № 2. С. 68–73.

Osipov G.A., Rodionov G.G. Application of the method of mass spectrometry of microbial markers in clinical practice // *Poliklinika.* 2013. № 2. P. 68–73.

16. Иванюшко Т.П., Симонова А.В., Поляков К.А., Кунижева М.А. Клинико-диагностическое значение хромато-масс-спектрометрии при медикаментозном остеонекрозе челюстей // *Стоматология.* 2019. № 3. С. 42–45.

Ivanyushko T.P., Simonova A.V., Polyakov K.A., Kunizheva M.A. Clinical and diagnostic value of chromatomass spectrometry in medical osteonecrosis of the jaws // *Stomatologiya.* 2019. № 3. P. 42–45.

17. Гострый А.В., Симонова А.В., Михайлова Н.А. и др. Хронический фарингит: этиология, патогенез, лечение.

Новые подходы к оценке этиопатогенеза // Архив внутренней медицины. 2019. Т. 9. № 1. С. 32–43.

Gostry A.V., Simonova A.V., Mikhailova N.A. et al. Chronic pharyngitis: etiology, pathogenesis, treatment. New approaches to the assessment of etiopathogenesis // Arkhiv Vnutrenney meditsiny. 2019. V. 9. № 1. P. 32–43.

18. Осипов Г.А., Быстрова О.В., Ловцевич С.М. Современный методический подход к неинвазивной оценке микроэкологического статуса человека методом масс-спектрометрии микробных маркеров. Комплексный подход коррекции нарушения микроэкологического статуса // Терапевт. 2020. № 10. С. 53–59.

Osipov G.A., Byistrova O.V., Lovtsevich S.M. Modern methodological approach to non-invasive assessment of human microecological status by microbial marker mass spectrometry. An integrated approach to the correction of violations of the microecological status // Terapevt. 2020. № 10. P. 53–59.

19. Ильин В.К., Соловьева З.О., Гизингер О.А. и др. Сравнение метода ПЦР-диагностики и метода масс-спектрометрии микробных маркеров применительно к оценке микробиоты полости рта // Клини. лабораторная диагностика. 2022. Т. 67. № 8. С. 484–488.

Ilyin V.K., Solovieva Z.O., Gizinger O.A. et al. Comparison of the method of PCR-diagnostics and the method of mass spectrometry of microbial markers in relation to the assessment of the microbiota of the oral cavity // Klinicheskaya Laboratornaya Diagnostika. 2022. V. 67. № 8. P. 484–488.

20. Баранов В.М., Осипов Г.А., Мухамедиева Л.Н. и др. Оценка микроэкологического статуса человека методом хроматомасс-спектрометрии // Новая мед. технология. МЗ РФ № НЮ-40006, 17.08.2009.

Baranov V.M., Osipov G.A., Mukhamedieva L.N. et al. Evaluation of the microecological status of a person by chromatography-mass spectrometry // New Medical Technology. Ministry of Healthcare of the Russian Federation № NYu-40006, 17.08.2009.

Поступила 13.02.2023

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PROPHYLATIC CONSUMPTION OF A STREPTOCOCCUS SALIVARIUS-BASED AUTOPROBIOTIC ON ORAL MICROBIOTA OF PARTICIPANTS IN ISOLATION STUDY «SIRIUS-2021»

Ilyin V.K.¹, Solovieva Z.O.¹, Nosovsky A.M.¹, Rykova M.P.¹, Sheblaeva A.S.¹, Sheblaev M.V.², Lovtsevich S.M.³, Kraeva L.A.⁴, Guizinger O.A.⁵

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Lomonosov Moscow State University

³Institute of Analytical Toxicology, Moscow

⁴Saint-Petersburg Pasteur Institute

⁵Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Medical Institute, Moscow

Effect of an autologous preparation based on Streptococcus salivarius (S. salivarius) on oral cavity microbiota was investigated in participants of 8-month isolation study SIRIUS-2021 with the purpose of developing programs of preventing immunomicrobiological disorders.

We investigated microbiota qualitative and quantitative dynamics, microbiological changes before and after consumption of the S. salivarius preparation using a bacteriologic technique, MALDI-TOF mass spectrometry, and microbial markers mass-spectrometry. Concentrations of secretion immunoglobulin A (sIgA) and IL-8, IL-10 cytokines in oral liquid were determined with the immune-enzyme assay.

It was found that the S. Salivarius-based autologous preparation had a favorable effect on the mouth microbiocenosis in all the participants in the study.

Key words: parodontium, oropharyngeal cavities, microbial markers mass-spectrometry, MALDI-TOF analysis, immune-enzyme assay, bacteriologic technique.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 94–101.

УДК 611.018.61

АКТИН ГЛАДКОМЫШЕЧНЫХ КЛЕТОК КАК КРИТЕРИЙ ГРАВИЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА МЫШЕЙ И МОНГОЛЬСКИХ ПЕСЧАНОК

Самойленко Т.В.¹, Шишкина В.В.¹, Антакова Л.Н.¹, Горюшкина Е.С.¹, Атякшин Д.А.^{1, 2}

¹Воронежский государственный медицинский университет им Н.Н. Бурденко Минздрава России, НИИ экспериментальной биологии и медицины, Воронеж

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, научно-образовательный ресурсный центр «Инновационные технологии иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа», Москва

E-mail: antailkka@mail.ru

Механизмы гравичувствительности гладкой мышечной ткани (ГМТ), несмотря на ключевые ее функции в организации деятельности органов желудочно-кишечного тракта, остаются недостаточно изученными в космической биомедицине.

Проведено определение содержания гладкомышечного актина (α -SMA) в оболочках фундального отдела желудка и тощей кишки мышей C57BL/6N (эксперимент на биоспутнике «Бион-М1», 30-суточный космический полет, синхронный эксперимент «БИОС-МЛЖ»), монгольских песчанок *Meriones unguiculatus* (эксперимент на космическом аппарате «Фотон-М3», 12-суточный орбитальный полет), а также после моделирования антиортостатического вывешивания по методу E.R. Morey-Holton (самцы-мыши C57BL/6N, 30 сут). Иммуногистохимическая детекция α -SMA осуществлялась на срезах толщиной 2 мкм мышинными моноклональными антителами Actin smooth muscle (1:100, Zytomed Systems, Cat. No. MSK030). Фотодокументирование и анализ микропрепаратов проведен с использованием микроскопа ZEISS Axio Imager A2. Количественная оценка α -SMA изучена на основе метода подсчета площади иммунопозитивных участков с помощью программы ImageJ 1.51J8.

При морфометрическом анализе α -SMA в мышечной оболочке желудка, тощей кишки мышей и монгольских песчанок в группах космических полетов выявлено снижение площади иммунопозитивных участков, что указывает на ослабление функциональной активности ГМТ. Гравичувствительность сократительных структур органов пищеварительной системы может быть обусловлена изменениями в структурных компонентах миофиламента актина гладких миоцитов или миофибробластов. В эксперименте по антиортостатическому вывешиванию достоверных изменений содержания уровня экспрессии α -SMA не обнаружено, что подтверждает изменение функциональных свойств мышечных оболочек полых органов пищеварительной системы в условиях невесомости.

Ключевые слова: пищеварительная система, желудок, тощая кишка, гладкая мышечная ткань, гладкомышечный

актин (α -SMA), космический полет, антиортостатическое вывешивание.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 102–110.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-102-110

В создании новых космических проектов пилотируемых полетов ученые работают не только над техническими и инженерными проблемами, но и над вопросами сохранения здоровья космонавтов. Одну из ведущих позиций по масштабу биологических эффектов, сопровождающих профессиональную деятельность экипажей Международной космической станции (МКС), занимает невесомость, которая влияет на физиологические функции организма и может стать причиной различных заболеваний [1, 2].

Желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) занимает значимое место в ряду жизненно важных систем организма человека и животных, определяющих уровень адаптации пребывания в экстремальных условиях [3]. Пищеварительная система обладает высокой гравичувствительностью к факторам космического полета, что может ограничить функциональные возможности космонавтов на борту МКС [4, 5]. В условиях космического полета происходят значимые изменения в органах пищеварительной системы [4, 5]. Установлено снижение эвакуаторной функции содержимого желудка и повышенное содержание в нем жидкости, расширение кишечника, что указывает на повышенную секреторную активность в органах [1]. В слизистой и других оболочках желудка и кишечника [4] выявлены структурные перестройки, вследствие чего возникает риск прогрессивного накопления преобразований на тканевом уровне, вплоть до формирования морфологических признаков атрофии и потери мышечной массы [6]. Все эти неблагоприятные последствия ставят под угрозу здоровье и работоспособность экипажа и успех миссии космического полета [6].

Гладкая мышечная ткань (ГМТ) – основной структурный и функциональный компонент всех висцеральных органов [7, 8] неспособный, в отличие от скелетной мускулатуры, к самопроизвольному сокращению. Благодаря сложным механизмам координации между сокращением и расслаблением гладкие мышцы выполняют перемещение различного содержимого внутри висцеральных органов и регулируют внутриорганный давление [7, 9].

В основе ГМТ находятся гладкие мышечные клетки (ГМК), обладающие высоким уровнем альфа-гладкомышечного актина, играющего неотъемлемую роль в регуляции создаваемого клетками механического напряжения [9]. Для сокращения ГМТ необходимы не только ремоделирование элемента цитоскелета актина, но и активация миозина, с формированием цитоскелетной сети для передачи силы, обусловленной сократительным аппаратом, во внеклеточный матрикс, а также для адаптации ГМК к механическим нагрузкам [9, 10]. Установлено, что экспрессировать α -SMA могут не только клетки мышечной ткани, миоциты, но и клетки фибробластического дифферона [11, 12]. Из-за весомой роли в функционировании жизненно важных систем организма исследования ГМТ представляют особый интерес в авиакосмической биологии и медицине. В то же время экспрессии α -SMA ГМК в условиях с измененной гравитацией ранее не изучались, что и послужило обоснованием проведения настоящего исследования.

Методика

Работа выполнена на базе Научно-исследовательского института экспериментальной биологии и медицины ВГМУ им. Н.Н. Бурденко. Проведен анализ количественного содержания α -SMA в оболочках фундального отдела желудка и во фрагментах тощей кишки млекопитающих: мышей C57BL/6N и монгольских песчанок *Meriones unguiculatus*. Эксперименты можно условно разделить на 3 блока.

Первый блок – исследования в рамках 30-суточного полетного эксперимента «Бион-М1 на 26 самцах мышей C57BL/6N (возраст 19–20 нед, вес 22–25 г). Полетная группа (КП) состояла из 5 животных. Исследования процессов восстановления после полета (АКП) проводили на 5 мышах, которые по возвращении на Землю находились 7 сут в виварийных условиях. Эти 2 группы животных получали пастообразный корм из стандартного комбикорма и воды, в качестве загустителя использовали казеин. Группы контроля (ККП и КА) по 8 животных были в каждой из 2 вышеуказанных групп, содержались в стандартных условиях, получали обычный комбикорм и воду во время всего эксперимента в свободном доступе. Отдельное направление исследования – наземный эксперимент по

30-суточному моделированию некоторых условий пребывания животных на борту биологического спутника «Бион-М1» в макете полетной аппаратуры «БИОС-МЛЖ» представлен 4 группами: группа биологического контроля (БК); виварийный контроль к группе наземного эксперимента (ВК-БК); группа реадaptации, обследованная спустя 7 сут после наземного моделирования (РБК); виварийный контроль к группе 7-суточной реадaptации после наземного моделирования (ВК-РБК) по 8 животных в каждой. Подробная информация по условиям пребывания лабораторных животных из эксперимента «Бион-М1» представлена в работе [13]. Все процедуры с животными были одобрены Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 319 от 4 апреля 2013 г.).

Второй блок исследований проходил в рамках научно-исследовательского проекта «Фотон-М3» на модуле «Контур-Л». В космическом аппарате были размещены монгольские песчанки *Meriones unguiculatus* (самцы) в возрасте 4–4,5 мес, со средней массой всех животных в группах 56,2 г [14]. Первая группа состояла из 12 животных, находившаяся 12 сут на борту космического аппарата «Фотон-М3». По возвращении из орбитального полета животные выводились из эксперимента спустя 21 ч. Вторая группа – животные синхронного наземного эксперимента, включала 11 монгольских песчанок. Животные содержались 12 сут в макете для моделирования условий космического полета в аппаратуре «Контур-Л». Песчанки из группы космического полета были размещены в модуле «Контур-Л» за 2 сут до полета. Корм в брикетах состоял из натуральных ингредиентов (злаки, сухофрукты, кормовые добавки и связующие вещества с содержанием влаги 20 %).

Животных из 3 групп подвергли эвтаназии через 1 сут после окончания соответствующего эксперимента. Средняя масса животных составляла около 51,6 г до полета и около 37,1 г после полета.

Из-за сбоя в системе телеметрии животным из синхронной группы скормливали половину ежедневного рациона с задержкой на 4 сут по сравнению с летной группой (с 9-х вместо 5-х суток). Средняя масса тела животных составляла около 63,4 г до эксперимента и около 54,2 г после эксперимента [14]. Третья группа исследования – виварийный контроль из 12 животных (в виварии ГНЦ РФ – ИМБП РАН). Животных в течение 2 нед содержали в стандартных клетках, сопоставимых по размеру с клеткой в полете, после их подвергли эвтаназии в день запуска. Основную группу кормили тем же количеством и качеством пищи, как и полетную группу (неисправность дозатора корма в этой группе не имитировалась). Животные были лишены воды в течение 14 сут в условиях полета. Средняя масса тела животных до эксперимента составляла около 53,7 г, после эксперимента – около 50,5 г.

Все исследования были проведены с соблюдением требований по гуманному обращению с животными в соответствии с решением Комиссии по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 206 от 07.10.2007 г.).

Третий блок – эксперименты с антиортостатическим вывешиванием, моделирующим условия измененной гравитации по методу E.R. Morey-Holton. Исследование проводилось в течение 30 сут с участием 18 самцов-мышей линии C57BL/6N, в возрасте 19–20 нед, со средней массой тела 27,5 г, содержащиеся на стандартном пищевом рационе. Животные были разделены на 3 экспериментальные группы: 1-я группа – группа 30-суточного антиортостатического вывешивания ($n = 6$); 2-я группа – группа реадaptации, при которой мыши находились в условиях 12-часовой опорной нагрузки после вывешивания в течение 30 сут ($n = 6$); 3-я группа – контрольная ($n = 6$), животные содержались в стандартных условиях [15]. Программа эксперимента и все процедуры с животными были одобрены Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН.

Сразу после вывода грызунов из эксперимента фрагменты фундального отдела желудка и тощей кишки животных фиксировали в растворе 10%-ного нейтрального формалина при комнатной температуре, согласно стандартному протоколу пробоподготовки [16].

Для обзорной микроскопии на микротоме изготавливали срезы из парафиновых блоков толщиной не более 4 мкм, которые окрашивали гематоксилином Джилла и эозином. Иммуногистохимическая детекция α -SMA выполнена с помощью мышиных моноклональных антител Actin smooth muscle (1:100, Zytomed Systems, Cat. No. MSK030, Берлин, Германия) на срезах толщиной 2 мкм, согласно стандартному протоколу [17].

Для репрезентативности выборки оценивали не менее 40 полей зрения. Фотодокументирование и анализ готовых микропрепаратов проведен на исследовательском микроскопе ZEISS Axio Imager.A2. Количественная оценка экспрессии α -SMA определялась на основе метода подсчета площади иммунопозитивных участков с применением программы ImageJ 1.51J8 и выражена в абсолютных и относительных значениях. Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета Statistica Inc., USA 12.0. Результаты представлены в виде среднего значения $M \pm m$ (стандартная ошибка среднего). Для оценки достоверности различий между двумя группами использовали t-критерий Стьюдента.

Результаты и обсуждение

В результате анализа микропрепаратов (окрашивание гематоксилином Джилла и эозином)

фрагментов фундального отдела желудка животных групп космического полета отмечены некоторые морфологические изменения, которые могут являться отражением воздействия факторов космического полета на структуру ткани. Стенки желудка монгольских песчанок и мышей C57BL/6N в норме имеют типовое гистологическое строение: слизистую, подслизистую, 3-компонентную мышечную и серозную оболочки (рис. 1, А). При исследовании образцов первого блока исследования (тканей желудка мышей C57BL/6N) в группе космического полета были обнаружены некоторые особенности строения слизистой оболочки, в том числе изменение целостности структуры желез желудка, участки слущивания эпителиоцитов. Выявленные признаки могут объясняться высокой чувствительностью клеток данного дифферона к экзогенным раздражителям. В мышечной оболочке наблюдалась тенденция к изменению цитоархитектоники гладких миоцитов и гистотопографическим перестройкам гладкой мускулатуры на уровне формирования функциональных пластов. При анализе образцов желудка «БИОС-МЛЖ» наблюдалось сохранение целостности железистого эпителия, нарушений в структуре мышечной оболочки не отмечалось.

При анализе микропрепаратов второго блока исследования в слизистой оболочке желудка монгольских песчанок группы космического полета были обнаружены некоторые морфологические изменения, обусловленные, вероятно, повышенной чувствительностью животных к стрессовым факторам, в том числе космического полета [18]. В частности, были выявлены «пустые» участки в железистом эпителии с десквамированными наложениями на апикальной поверхности сохранных клеток, данные зоны имели морфологические признаки некроза (см. рис. 1, Б). Вокруг этих участков в собственной пластинке слизистой оболочки определялась локальная воспалительная инфильтрация. Визуально увеличивалась толщина подслизистой оболочки в связи с развитием периваскулярного отека и увеличения соединительнотканного компонента в строении органа. Такие же признаки были характерны для мышечной оболочки: между разнонаправленными волокнами мышечной ткани располагались пласты соединительнотканых тяжей, иногда принимающих выраженный характер, тогда как в норме эндомиозий имеет более организованную и компактную структуру.

При изучении желудка мышей после антиортостатического вывешивания (третий блок исследования) выраженных дистрофических изменений в слоях стенки органа обнаружено не было: несмотря на визуально определяемое уплощение железистого эпителия, отсутствовали признаки вакуоляризации и десквамации.

Стенка тощей кишки монгольских песчанок и мышей C57BL/6N имеет следующее строение:

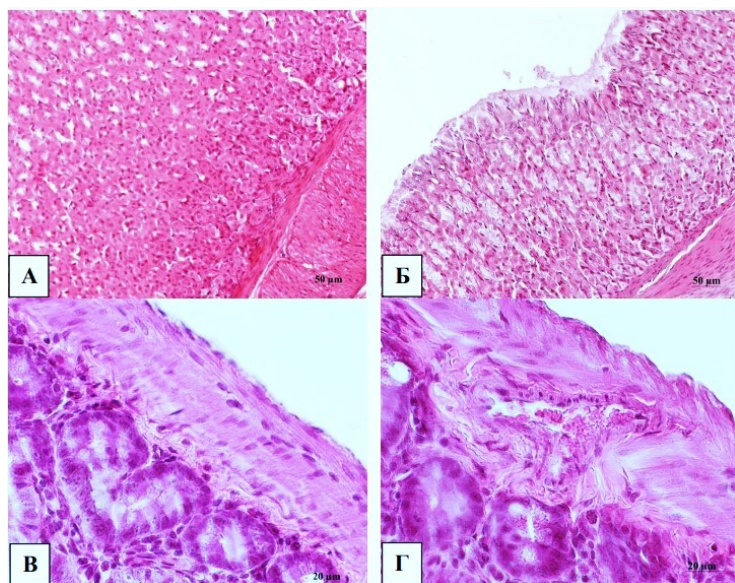


Рис. 1. Фрагменты фундального отдела стенки желудка и тощей кишки монгольских песчанок *Meriones unguiculatus*.

Методика: окрашивание гематоксилином и эозином. А, Б – морфология стенки желудка в контрольной группе (А) и группе космического полета (Б); В, Г – морфология стенки тощей кишки в контрольной группе (В) и группе космического полета (Г). Масштабная шкала: А, Б – 50 мкм; В, Г – 20 мкм

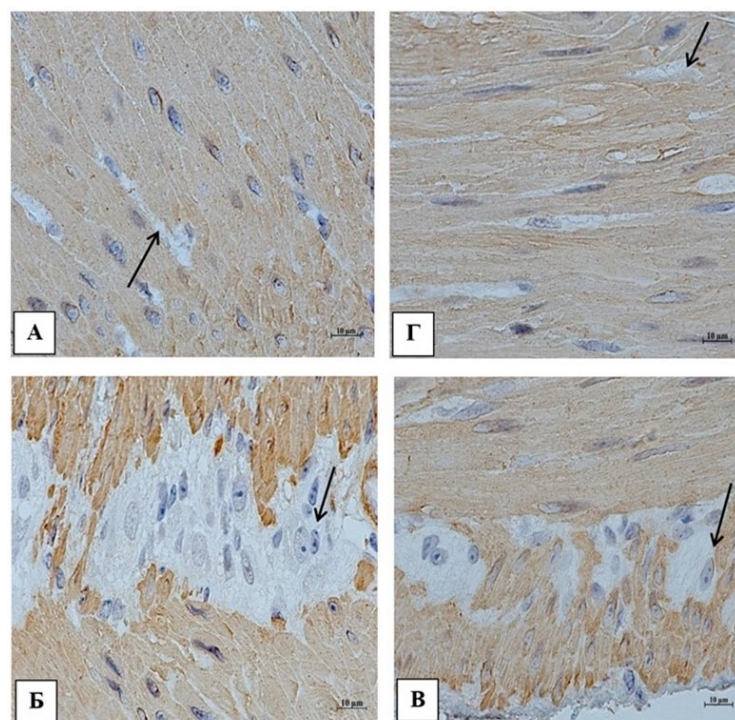


Рис. 2. Мышечная оболочка фундального отдела желудка мышей C57BL/N6.

Методика: иммуногистохимическая детекция α-SMA. А – виварийный контроль; Б – группа космического полета; Г – контроль к группе адаптации; В – адаптация после космического полета. Стрелками указаны А, Г – иммунонегативные участки мышечной оболочки; Б, В – гладкие миоциты, не экспрессирующие α-SMA. Масштабная шкала – 10 мкм

слизистая, подслизистая, 2-компонентная мышечная и серозная оболочки. В норме слизистая оболочка благодаря наличию складок, ворсинок и крипт имеет характерное рельефное строение.

При изучении образцов тощей кишки монгольских песчанок второго блока исследования («Фотон-М3») в группе космического полета были обнаружены морфологические особенности, характерные для реактивных изменений: сглаживание рельефной структуры слизистой оболочки вследствие появления большого количества клеток с вакуолизированной цитоплазмой и пикнотичными ядрами. В нижележащих слоях (подслизистая и мышечная оболочки) обнаружены следующие изменения: в группе космического полета наблюдались признаки отека, что может объясняться выраженным кровенаполнением сосудов; разрастание волокнистого компонента соединительной ткани как в подслизистой, так и в межмышечной прослойке с нарушением архитектоники пучков мышечных волокон (см. рис. 1, Г).

Для уточнения молекулярных перестроек в структуре гладких миоцитов был использован иммуногистохимический метод исследования.

Желудок. В результате анализа микропрепаратов первого блока исследования, космического проекта «Бион-М1», выявлено снижение иммунопозитивных участков экспрессии α-SMA в группе орбитального полета (табл. 1, рис. 2).

При морфологической оценке экспрессии α-SMA стенки желудка наблюдались следующие различия: в группах мышей виварийного пребывания и контроля к группе адаптации отмечалась равномерная экспрессия α-SMA как в мышечной пластинке слизистой оболочки, так и в мышечном слое (см. табл. 1). В группе космического полета выявлено значительное количество клеток со слабой иммунопозитивностью к α-SMA, причем преобладающее их количество определялось в мышечной оболочке (см. рис. 2, Б).

Иммунопозитивные α-SMA-клетки окружены эндомизией – волокнистым компонентом соединительной ткани, составляющим примерно 10 % от общей площади мышечной оболочки (см. табл. 1) и не экспрессирующим α-SMA, что соответствует норме. В межмышечной строме располагаются нервные узлы, нейроны которых не экспрессируют α-SMA. Дифференцировка α-SMA-негативных гладкомышечных клеток осуществлялась по характерным морфологическим

Таблица 1

Экспрессия α -SMA в желудке (фундальный отдел) и в тощей кишке мышей C57BL/6N эксперимента «Бион-М1»

Группы животных	Слизистая оболочка			Мышечная оболочка		
	Анализируемая площадь, мм ² (M $\pm$ m)	Площадь экспрессии α -SMA, мм ² (M $\pm$ m)	% α -SMA	Анализируемая площадь, мм ² (M $\pm$ m)	Площадь экспрессии α -SMA, мм ² (M $\pm$ m)	% α -SMA
<i>Желудок</i>						
ККП, n = 8	3,86 $\pm$ 0,04	0,19 $\pm$ 0,01	4,87	3,12 $\pm$ 0,07	2,74 $\pm$ 0,06	87,78
КП, n = 5	3,88 $\pm$ 0,09	0,20 $\pm$ 0,01	5,28*	3,10 $\pm$ 0,06	2,32 $\pm$ 0,02*	74,91*
КА, n = 8	3,73 $\pm$ 0,02	0,20 $\pm$ 0,002	5,45	3,29 $\pm$ 0,02	2,81 $\pm$ 0,09	85,32
АКП, n = 5	3,72 $\pm$ 0,02	0,21 $\pm$ 0,002	5,59	2,94 $\pm$ 0,05*	2,35 $\pm$ 0,04*	79,79
<i>Тощая кишка</i>						
ККП, n = 8	3,71 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,002	4,50	0,57 $\pm$ 0,02	0,49 $\pm$ 0,01	85,92
КП, n = 5	3,78 $\pm$ 0,05	0,20 $\pm$ 0,01*	5,17*	0,58 $\pm$ 0,02	0,43 $\pm$ 0,001*	73,50*
КА, n = 8	3,73 $\pm$ 0,03	0,16 $\pm$ 0,01	4,42	0,60 $\pm$ 0,03	0,51 $\pm$ 0,03	84,81
АКП, n = 5	3,61 $\pm$ 0,03	0,19 $\pm$ 0,002*	5,22*	0,57 $\pm$ 0,03	0,46 $\pm$ 0,03	80,89

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – p < 0,05 по сравнению с контролем.

Таблица 2

Экспрессия α -SMA в желудке (фундальный отдел) и тощей кишке монгольских песчанок эксперимента «Фотон-М3»

Группы животных	Слизистая оболочка			Мышечная оболочка		
	Анализируемая площадь, мм ² (M $\pm$ m)	Площадь экспрессии α -SMA, мм ² (M $\pm$ m)	% α -SMA	Анализируемая площадь, мм ² (M $\pm$ m)	Площадь экспрессии α -SMA, мм ² (M $\pm$ m)	% α -SMA
<i>Желудок</i>						
К, n = 12	3,76 $\pm$ 0,03	0,21 $\pm$ 0,002	5,67	3,59 $\pm$ 0,02	3,24 $\pm$ 0,02	90,16
КП, n = 12	3,55 $\pm$ 0,02	0,20 $\pm$ 0,002	5,52	3,42 $\pm$ 0,03	2,59 $\pm$ 0,04*	75,80*
СЭ, n = 11	3,54 $\pm$ 0,02	0,19 $\pm$ 0,001	5,46*	3,57 $\pm$ 0,02	3,08 $\pm$ 0,02	86,23
<i>Тощая кишка</i>						
К, n = 12	3,68 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,003	7,16	1,51 $\pm$ 0,02	1,35 $\pm$ 0,01	88,97
КП, n = 12	3,68 $\pm$ 0,02	0,31 $\pm$ 0,002	8,48	1,49 $\pm$ 0,01	1,13 $\pm$ 0,01	75,71*
СЭ, n = 11	3,65 $\pm$ 0,01	0,26 $\pm$ 0,005	7,12*	1,49 $\pm$ 0,02	1,24 $\pm$ 0,02	83,29

признакам: веретенообразная форма миоцита и вытянутое ядро центральной локализации (см. рис. 2, Б, В).

В группах полета и адаптации после космического полета наблюдались скопления гладких миоцитов, не экспрессирующих α -SMA, причем преобладающее их количество идентифицировалось в мышечной оболочке фундального отдела желудка мышей после пребывания в условиях невесомости (см. рис. 2, Б, В). В большинстве случаев данные участки встречались на границе 2 разнонаправленных слоев ГМТ: продольного – снаружи, циркулярного – внутри.

При анализе экспрессии α -SMA в слизистой оболочке желудка была установлена небольшая

тенденция к увеличению иммунопозитивной области α -SMA – 5,28 % от общей площади слизистой оболочки в группе космического полета по сравнению с группой контроля – 4,87 % (см. табл. 1).

Различий в площади экспрессии α -SMA в образцах, полученных в синхронном эксперименте в макете полетной аппаратуры «БИОС-МЛЖ», как в слизистой оболочке, так и в мышечной между группами не наблюдалось.

Аналогичная полетному эксперименту «Бион-М1» морфологическая картина наблюдалась при анализе микропрепаратов второго блока нашего исследования (табл. 2). Материал представлен из полетного эксперимента, который проходил в

рамках научно-исследовательского проекта «Фотон-М3». Все морфологические изменения в микропрепаратах подтвердились и при количественном подсчете площади иммунопозитивных участков α -SMA в ГМТ (см. табл. 2). В частности, было установлено снижение площади экспрессии α -SMA в мышечной оболочке фундального отдела желудка монгольских песчанок *Meriones unguiculatus* в группе космического полета по сравнению с животными из группы контроля (см. табл. 2).

При количественном анализе экспрессии α -SMA в микропрепаратах третьего блока исследования (эксперимента по антиортостатическому вывешиванию) установлена другая тенденция по сравнению с лабораторными животными, вернувшимися из орбитального полета. Значимых изменений содержания экспрессии α -SMA в мышечных оболочках желудка мышей из групп контроля (88,51 %), вывешивания (85 %) восстановления (85,08 %) не выявлено. Анализ экспрессии α -SMA в мышечной пластинке слизистой оболочки желудка мышей показал в группе вывешивания незначительное снижение – до 4,45 % от общей площади. В группах виварийного контроля и восстановления показатель иммунопозитивности к α -SMA был практически одинаковым, составляя 5,55 и 5,70 % соответственно.

Тощая кишка. При исследовании микропрепаратов тощей кишки мышей C57BL/N6 и монгольских песчанок была обнаружена аналогичная динамика экспрессии α -SMA в желудке, которая заключалась в снижении экспрессии α -SMA после космического полета. Количественный подсчет площади экспрессии α -SMA в тощей кишке мышей C57BL/6N первого блока исследования эксперимента «Бион-М1» представлен в табл. 1.

Анализ α -SMA положительных клеток в слизистой оболочке тощей кишки мышей C57BL/6N показал повышение иммунопозитивных структур в группе космического полета по сравнению с контролем (см. табл. 1, рис. 3), что может быть связано с экспрессией α -SMA не только гладкими миоцитами, но и клетками фибробластического дифферона, например миофибробластами [11, 19]. В соединительнотканной строме кишечных ворсинок располагались α -SMA положительные клетки, причем преобладающее количество иммунопозитивных участков было обнаружено в группе космического полета (см. рис. 3, Б). Данное динамическое изменение может быть обусловлено ремоделированием волокнистого компонента соединительной ткани в условиях влияния факторов измененной гравитации [19].

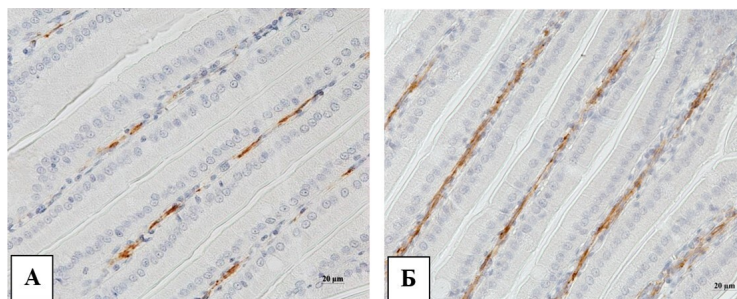


Рис. 3. α -SMA-позитивные структуры в ворсинках слизистой оболочки тощей кишки мышей C57BL/6N.

Методика: иммуногистохимическое окрашивание α -SMA. А – контрольная группа; Б – группа космического полета. Масштабная шкала – 20 мкм

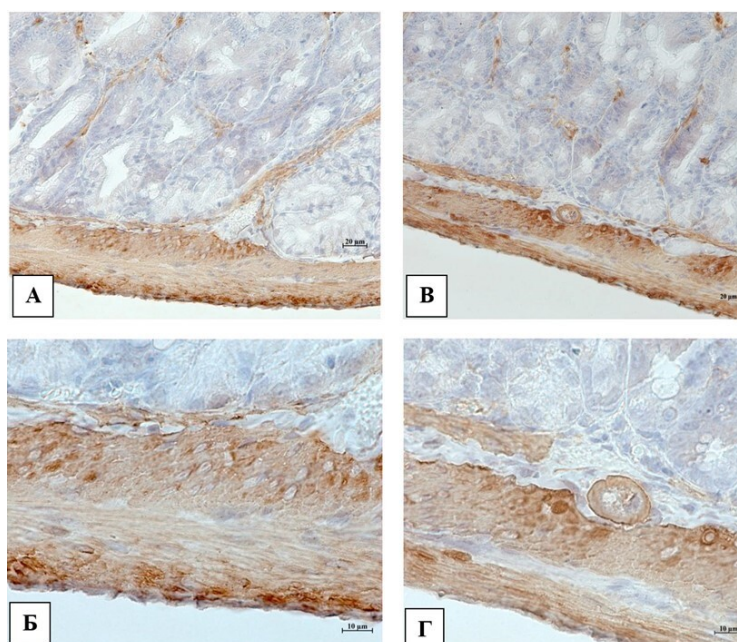


Рис. 4. Фрагменты тощей кишки монгольских песчанок *Meriones unguiculatus* (эксперимент «Фотон-М3»).

Методика: иммуногистохимическая детекция α -SMA. А, Б – виварийный контроль; В, Г – группа космического полета. Масштабная шкала: А, В – 20 мкм; Б, Г – 10 мкм

На рис. 4 представлен фрагмент тощей кишки монгольских песчанок *Meriones unguiculatus* (эксперимент «Фотон-М3»). В результате иммуноморфометрического анализа мышечных волокон в группе космического полета выявлены многочисленные скопления иммунонегативных групп клеток. В контрольной группе преобладают α -SMA положительные участки (см. табл. 2, рис. 4).

В микропрепаратах третьего блока исследования (эксперимента антиортостатического вывешивания) изменений в экспрессии α -SMA слизистой и мышечной оболочках (далее в скобках соответственно)

тощей кишки мышей C57BL/6N между группами контроля (4,61 и 86,04 %), вывешивания (3,69 и 89,44 %) и восстановления (4,53 и 86,59 %) выявить не удалось.

Факторы космического полета вызывают изменения в структуре ГМТ пищеварительной системы с малоизученной молекулярной этиологией. Результаты нашего исследования свидетельствуют о том, что условия невесомости вызывали уменьшения содержания α -SMA в сократительных структурах изучаемых полых органов ЖКТ. Данный факт был продемонстрирован у монгольских песчанок после 12-суточного космического полета (см. табл. 2) и мышей C57BL/6N после 30-суточного космического полета (см. табл. 1). Полученные данные могут объяснять один из механизмов снижения функциональной активности ГМТ в стенке желудка и тощей кишки после орбитального полета.

Сбалансированная координация сократительной деятельности структурно-функциональных элементов гладкой мускулатуры органов ЖКТ необходима для адекватного пищеварения, изменение которой лежит в основе формирования ряда нарушений моторики желудка и перистальтики кишечника. Исходя из полученных результатов в синхронном наземном эксперименте проекта «Бион-М1» в макете полетной аппаратуры «БИОС-МЛЖ», можно сделать вывод, что качественный характер корма не влияет на структурные перестройки гладкомышечного аппарата, а именно на площадь экспрессии α -SMA.

Установлено, что, в отличие от других дифференцированных клеток, гладкие миоциты не являются окончательно детерминированными, обладают пластичностью и могут переходить от сократительного к пролиферативному, а также про-мигрирующему и синтетическому фенотипам [20]. Такие перестройки ГМТ характеризуются снижением экспрессии сократительных миофиламентов – актина гладких миоцитов или миофибробластов. Переключение фенотипа ГМТ от сократительного к синтетическому характеризуется как ключевое событие для пролиферации и дальнейшей миграции ГМК. Однако в космической биомедицине обнаруженную фенотипическую пластичность ГМК целесообразно рассматривать в аспекте изменения способности ГМК к ремоделированию внеклеточного матрикса для формирования адаптации органов пищеварительной системы к факторам орбитального полета.

Проведенное нами исследование указывает на необходимость дальнейшего изучения основных молекулярных механизмов переключения фенотипа ГМТ пищеварительной системы как в послеполетных группах, так и в группах реадаптации после космического полета. В эксперименте по антиортостатическому вывешиванию из третьего блока исследования достоверных изменений площади

иммунопозитивных участков экспрессии α -SMA выявить не удалось, что может указывать на разнонаправленное влияние факторов космического полета и антиортостатического вывешивания.

Ранее было показано, что моделирование микрогравитации с помощью аппарата случайного позиционирования приводило к уменьшению содержания α -SMA в культурах фибробластов, что ухудшало их миграционные свойства [21, 22]. Это позволяет считать уровень экспрессии α -SMA одной из точек приложения биологических эффектов невесомости в других клетках мезодермального происхождения, наряду с гладкими миоцитами. Так, при моделировании искусственной микрогравитации на культивированных клетках гладкой мускулатуры аорты крысы с помощью аппарата роллерного культивирования происходила дезорганизация цитоскелета вместе с подавлением пролиферации и усилением апоптоза [23]. Кроме того, при 4-недельном моделировании микрогравитации в эксперименте с антиортостатическим вывешиванием крыс наблюдали уменьшение слоев ГМТ вместе с содержанием в них миофиламентов в стенке бедренных артерий и передних большеберцовых артерий [24].

Выводы

1. Гравичувствительность гладких миоцитов стенки полых органов ЖКТ представляет собой специфические адаптивные изменения на условия измененной гравитации, аналогичные другим клеткам мезодермального происхождения, сократительный аппарат которых обладает α -SMA.
2. Дальнейшие исследования в данном направлении позволяют расширить существующие представления о механизмах формирования органоспецифических особенностей гравичувствительности ГМТ, открывая новые возможности для совершенствования алгоритмов профилактики неблагоприятных биологических эффектов невесомости.

Список литературы

1. Chai S., Guo S., Yang J. et al. Inflammation is involved in response of gastric mucosal epithelial cells under simulated microgravity by integrated transcriptomic analysis // *Am. J. Transl. Res.* 2021. V. 13. № 8. P. 9195–9207.
2. Buravkova L., Larina I., Andreeva E., Grigoriev A. Microgravity effects on the matrisome // *Cells.* 2021. V. 10. № 9. P. 22–27.
3. Yang J.Q., Jiang N., Li Z.P. et al. The effects of microgravity on the digestive system and the new insights it brings to the life sciences // *Life Sci. Space Res. (Amst.).* 2020. V. 27. P. 74–82.
4. Атякшин Д.А., Алексеева Н.Т., Ключкова С.В., Никитюк Д.Б. Состояние коллагеновых волокнистых

структур экстрацеллюлярного матрикса соединительной ткани желудка и кишечника мышей после 30-суточного орбитального полета // Вопросы питания. 2019. Т. 88. № 1. С. 26–40.

Atyakshin D.A., Alekseeva N.T., Klochkova S.V., Nikityuk D.B. The state of collagen fibrous structures of extracellular matrix of connective tissue of the stomach and intestines of mice after a 30-day orbital flight // *Voprosy pitaniya*. 2019. V. 88. № 1. P. 26–40.

5. Афонин Б.В. Гемодинамический механизм, определяющий возникновение гиперсекреторного состояния желудка в условиях микрогравитации // *Авиакосм. и экол. мед.* 2013. Т. 47. № 4. С. 10–11.

Afonin B.V. Hemodynamic mechanism determining the occurrence of hypersecretory state of the stomach in microgravity // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2013. V. 47. № 4. P. 10–11.

6. Laurens C., Simon C., Vernikos J. et al. Revisiting the role of exercise countermeasure on the regulation of energy balance during space flight // *Front. Physiol.* 2019. № 10. P. 321.

7. Borsdorf M., Böhl M., Siebert T. Influence of layer separation on the determination of stomach smooth muscle properties // *Pflugers Arch.* 2021. V. 473. № 6. P. 911–920.

8. Donadon M., Santoro M.M. The origin and mechanisms of smooth muscle cell development in vertebrates // *Development*. 2021. V. 148. № 7. e197384.

9. Самойленко Т.В., Шишкина В.В., Антакова Л.Н., Атыкшин Д.А. Гладкая мышечная ткань – перспективная мишень трансляционных исследований в космической биомедицине // *Авиакосм. и экол. мед.* 2022. Т. 56. № 6. С. 5–15.

Samoylenko T.V., Shishkina V.V., Antakova L.N., Atyakshin D.A. Smooth muscle tissue is a promising target for translational research in the field of space biomedicine // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2022. V. 56. № 6. P. 5–15.

10. Tang D.D. The dynamic actin cytoskeleton in smooth muscle // *Adv. Pharmacol.* 2018. V. 81 P. 1–38.

11. Pastuła A., Marcinkiewicz J. Cellular interactions in the intestinal stem cell niche // *Arch. Immunol. Ther. Exp. (Warsz.)*. 2019. V. 67. № 1. P. 19–26.

12. Jerome J.A., Wenzel S.E., Trejo Bittar H.E. Digital imaging analysis reveals reduced alveolar α-smooth muscle actin expression in severe asthma // *Appl. Immunohistochem. Mol. Morphol.* 2021. V. 29. № 7. P. 506–512.

13. Космический научный проект «Бион-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования / А.И. Григорьев, ред. М., 2016.

Space scientific project «Bion-M1»: medical and biological experiments and research / A.I. Grigor'ev, ed. Moscow, 2016.

14. Krivososov Y.S., Gulimova V.I., Buzmakov A.V. et al. Micro-CT study of Mongolian gerbil humeral bone after prolonged spaceflight based on a new algorithm for delimitation of long-bone regions // *Front. Physiol.* 2021. V. 12. e752893.

15. Маркина Е.А., Бобылева П.И., Алексеева О.Ю. и др. Характеристика прогениторных клеток костного мозга мышей C57BL/6N после 30-суточного антиортостатического вывешивания и 12-часовой реадaptации к опорной нагрузке // *Цитология*. 2019. Т. 61. № 11. С. 883–894.

Markina E.A., Bobyleva P.I., Alekseeva O.Yu. et al. Characteristics of progenitor cells of the bone marrow of C57BL/6N mice after 30-day antiorthostatic hanging and 12-hour readaptation to the support load // *Citologiya*. 2019. V. 61. № 11. P. 883–894.

16. Атыкшин Д.А., Бухвалов И.Б., Тиманн М. Гистохимия ферментов. Методическое пособие для студентов, ординаторов и аспирантов медицинских и фармацевтических вузов. Воронеж, 2016.

Atyakshin D.A., Buchwalow I.B., Timann M. Histochemistry of enzymes. Methodical manual for students, residents and postgraduates of medical and pharmaceutical universities. Voronezh, 2016.

17. Buchwalow I.B., Boecker W. Immunohistochemistry: Basics and Methods, 1st ed. Heidelberg; Dordrecht; London; N.Y., 2010.

18. Атыкшин Д.А., Быков Э.Г. Морфологические изменения стенки желудка монгольских песчанок после 12-суточного орбитального полета на космическом аппарате «Фотон-М3» // *Авиакосм. и экол. мед.* 2012. Т. 46. № 5. С. 26–33.

Atyakshin D.A., By'kov E.G. Morphological changes in the stomach wall of Mongolian gerbils after a 12-day orbital flight on the «Photon-M3» spacecraft // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2012. V. 46. № 5. P. 26–33.

19. Shishkina V., Kostin A., Volodkin A. et al. The remodeling of dermal collagen fibrous structures in mice under zero gravity: the role of mast cells // *Int. J. of Mol. Sci.* 2023. V. 24. № 3. P. 19–39.

20. Li W., Olseen A., Xie Y. et al. Mfge8 attenuates human gastric antrum smooth muscle contractions // *J. Muscle Res. Cell Motil.* 2021. V. 42. № 2. P. 219–231.

21. Fedeli V., Cucina A., Dinicola S. et al. Microgravity modifies the phenotype of fibroblast and promotes remodeling of the fibroblast–keratinocyte interaction in a 3D co-culture model // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. V. 23. P. 2163.

22. Sapudom J., ElGindi M., Arnoux M. et al. Fibroblast differentiation and matrix remodeling impaired under simulated microgravity in 3D cell culture model // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22. № 21. P. 11911.

23. Kang H., Fan Y., Sun A. et al. Simulated microgravity exposure modulates the phenotype of cultured vascular smooth muscle cells // *Cell Biochem. Biophys.* 2013. V. 66. № 1. P. 121–130.

24. Mao Q.W., Zhang L.F., Zhang L.N., Ma J. Ultrastructural changes of arterial wall from different body parts of rats during simulated weightlessness // *Space Med. Med. Eng. (Beijing)*. 1999. V. 12. № 4. P. 249–253.

Поступила 19.05.2023

ACTIN OF SMOOTH MUSCLE CELLS AS A CRITERION OF GRAVITY-SENSITIVITY OF THE GASTROINTESTINAL TRACT OF MICE AND MONGOLIAN GERBILS

**Samoilenko T.V.¹, Shishkina V.V.¹,
Antakova L.N.¹, Goryushkina E.S.¹,
Atiakshin D.A.^{1, 2}**

¹Burdenko Voronezh State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Research Institute of Experimental Biology and Medicine, Voronezh

²Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Scientific and Educational Resource Center «Innovative Technologies for Immunophenotyping, Digital Spatial Profiling and Ultrastructural Analysis», Moscow

Despite the key role of the smooth muscle tissue (SMT) in the gastrointestinal organs functioning, mechanisms of SMT gravity sensitivity still remain inadequately studied in space biomedicine.

Smooth muscle actin (α -SMA) was studied in membranes of the stomach and small gut fundus in mice C57BL/6N (experiment in 30-d BION-M1 mission and synchronous

control BIOS-MLZh), Mongolian gerbils Meriones unguiculatus (experiment in 12-d Foton-M3 missions), and after 30-d tail-suspension according to E.R. Morey-Holton (C57BL/6N males). Immunohistochemical detection of α -SMA was conducted in 2 μ m sections using the mouse SMA monoclonal antibodies (1:100, Zytomed Systems, Cat. No. MSK030). Documentary photography and analysis of micropreparations were performed with microscope ZEISS Axio Imager A2. Quantitative analysis was performed on the basis of the area of immunopositive sections using ImageJ 1.51J8.

Morphometric analysis of α -SMA in muscular coat of the stomach and jejunum of the space-flown mice and gerbils detected a reduction of immunopositive sections which points to weakening of the SMT functional activity. Gravitational sensitivity of the gastrointestinal contraction structures can be conditioned by changes in structural components of actin myofilament in smooth myocytes or myofibroblasts. Absence of changes in the α -SMA expression after tail-suspension confirms that microgravity affects functional properties of the gastrointestinal muscular coats.

Key words, stomach, jejunum, smooth muscle tissue, smooth muscle actin (α -SMA), space flight, tail-suspension.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 102–110.

МЕТОДИКИ

УДК 613.6 [512.643:622.276]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СИСТЕМЫ МЕДИЦИНСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ

Орлов О.И., Мамонова Е.Ю., Переведенцев О.В.

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

E-mail: perevol@bk.ru

Охрана здоровья персонала является неотъемлемой частью корпоративной социальной политики нефтедобывающих компаний, организованных по дивизиональному принципу. Система медицинского обеспечения, основанная на аутсорсинге, требует эффективной системы контроля ее функционирования. Поскольку она включает десятки объектов, подобный контроль возможен только при использовании цифровых технологий.

Для реализации данной задачи был выбран матричный метод представления информации. Были разработаны две матрицы: Матрица результатов управления рисками для здоровья и Матрица ресурсно-процессного управления рисками для здоровья. Представлена система количественной оценки рисков, ключевых индикаторов ресурсов, процессов и результатов медицинского обеспечения персонала для каждой группы показателей. Для этого использована пятибалльная шкала, экспертным путем определены весовые коэффициенты для каждого фактора.

Разработанная методика была применена для анализа состояния здоровья и оценки системы медицинского обеспечения на 49 предприятиях. Особое внимание уделялось предприятиям, находящимся в «оранжевой» зоне относительного неблагополучия (51–75 баллов). За 3 года наблюдений в ней было зарегистрировано 9–10 предприятий, при этом 4 предприятия – в обеих матрицах. На основе анализа отчетов были разработаны комплексные меры по коррекции ситуации оказания медицинской помощи для конкретных предприятий.

Построение матриц рисков для здоровья с применением информационных технологий позволяет вести мониторинг на значительном количестве предприятий, оперативно получать информацию, идентифицировать проблемные ситуации и принимать адресные управленческие решения.

Ключевые слова: система медицинского обеспечения, нефтяная отрасль, риск-ориентированный менеджмент в здравоохранении, риски для здоровья, матричный метод, медицинские информационные системы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 111–117.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-111-117

Нефтяная промышленность является одним из основных сегментов российской экономики. Однако большинство ключевых профессий в отрасли сопряжены с повышенными рисками для здоровья работников. В связи с этим актуальными являются не только изучение условий труда и заболеваемости у персонала, занятого добычей, переработкой и транспортировкой нефти, но и разработка научно обоснованных мероприятий по профилактике и лечению заболеваний в рамках совершенствования системы медицинского обеспечения. Охрана здоровья персонала является неотъемлемой частью бизнес-процессов и корпоративной социальной политики, что особенно важно для нефтедобывающих компаний, организованных по дивизиональному принципу и ведущих деятельность, в том числе в неблагоприятных и экстремальных климатических условиях.

За последние годы в научной литературе появилось немало исследований, посвященных различным аспектам заболеваемости, профилактическим медицинским осмотрам, управлению рисками для здоровья работников нефтяной промышленности, а также анализу моделей медицинского обеспечения предприятий отрасли. В немалой степени этому способствовало освоение и расширение деятельности на северных месторождениях, которое сопровождается дополнительными рисками для здоровья человека.

В настоящее время во многих промышленных компаниях получила распространение модель медицинского обеспечения, основанная на аутсорсинге. Практика аутсорсинга в сфере медицинского обеспечения состоит в заключении договора с организацией-партнером (обычно – медицинской организацией территориального здравоохранения) о предоставлении медицинских услуг, с передачей ей всех обязательств согласно составленному договору [1, 2].

Однако система, основанная на аутсорсинге, более неоднородна, поскольку зависит от состояния

территориального здравоохранения. Ее эффективность определяется комплексом факторов, таких как применение единых корпоративных стандартов медицинской помощи, материально-техническое обеспечение, уровень квалификации медицинских кадров, решение организационных вопросов (особенно при оказании экстренной медицинской помощи), что требует гибкой и эффективной системы контроля ее функционирования [3, 4].

Подобная система управления качеством медицинской помощи (УКМП) должна включать мониторинг, аудит, систему оценки и обратной связи в виде адресных управленческих решений, принимаемых в течение приемлемого интервала времени. С учетом того, что система включает десятки предприятий и, соответственно, здравпунктов, подобный контроль возможен только при использовании цифровых технологий, автоматизации сбора данных и их обработки.

Логика построения системы УКМП основана на следующих положениях:

- процесс оценки рисков позволяет собрать исходные данные для основной системы УКМП;
- управление рисками дает возможность исключить (там, где возможно) или снизить их влияние на здоровье и тем самым способствует снижению заболеваемости, в том числе профессиональными заболеваниями;
- анализ заболеваемости в динамике позволяет оптимизировать использование ресурсов, направляемых на обеспечение медицинской помощи;
- система УКМП основана на сборе текущей информации о медицинской помощи, занесение ее в базу данных; анализе, оценке, создании стандартов по мере накопления данных (фактические стандарты), их сравнении с заданными значениями (нормативные стандарты);
- система УКМП использует данные унифицированных отчетов, поступающих со здравпунктов.

Согласно концепции риск-менеджмента выделяют финансовые, юридические, репутационные, техногенные, экологические риски, риски для здоровья и т. д. Количественная оценка рисков для здоровья наименее отражена в научных публикациях, хотя, с одной стороны, они диалектически связаны с большинством других типов рисков, а с другой – их реализация имеет прямое отражение в других категориях рисков в виде экономического ущерба, правовых последствий для работодателей, техногенных инцидентах с различными последствиями.

Риски для здоровья – неоднородная группа рисков природного, техногенного и антропогенного происхождения, выделенных в классы рисков, связанных с неблагоприятными воздействиями условий труда, влияющих на здоровье работников, занятых в определенных отраслях или предприятиях, имеющих различные профессии. Согласно Трудовому

кодексу Российской Федерации от 30.12.2001 N197-ФЗ «...профессиональный риск – вероятность причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору или в иных случаях, установленных настоящим Кодексом, другими федеральными законами» [5].

Управление риском – это многоступенчатый процесс, включающий выявление, оценку и реагирование на риски для здоровья, цель которого – уменьшить и компенсировать ущерб для здоровья при наступлении неблагоприятных событий.

Для реализации задачи был выбран матричный метод представления информации. Этот метод достаточно широко используется в промышленной медицине, как в официальных документах, так и в научных исследованиях, построенных на теории рисков. Согласно общепринятым определениям, матрица – это «математический объект, записываемый в виде прямоугольной таблицы (например, целых, действительных или комплексных чисел), содержащей некоторое количество строк (m) и некоторое количество столбцов (n). Числа m и n называются порядками матрицы, которая представляет собой совокупность строк и столбцов [6].

Построение матрицы может преследовать различные цели, а для количественных оценок рисков используются различные шкалы и факторы, что свидетельствует о значительных, практически универсальных ее возможностях [7]. Для построения матриц учитываемой единицей, обладающей количественными признаками, может быть сам риск (его принадлежность к определенной группе, вероятность его реализации и тяжесть последствий), результаты спецоценки условий труда, происшедшие техногенные аварии и другие детерминанты [8–10].

Однако в любом случае матрица оценки и управления рисками для здоровья работников – это таблица с критериями для качественного анализа и оценки вероятности (частоты) и тяжести последствий опасного события (происшествия) для определения значения риска в области медицинского обеспечения и охраны здоровья работников.

С учетом целей и задач проведенной работы за единицу наблюдения было выбрано промышленное предприятие, поскольку это соответствует структуре компании и первые два уровня оказания медицинской помощи, включая здравпункты, «привязаны» именно к предприятиям.

Цель работы – разработка, апробация и внедрение программного продукта, позволяющего проводить мониторинг состояния здоровья работников предприятий крупной промышленной компании (организованной по дивизиональному принципу), проведение оценки ресурсов медицинского обеспечения промышленных объектов, определение

динамики ситуации за любой выбранный период и принятие своевременных обоснованных управленческих решений в соответствии с концепцией риск-ориентированного менеджмента с применением матричного метода отображения информации.

Методика

Для оценки рисков была использована классификация, приведенная в ГОСТ 12.0.003-2015 [11], включающая природные (климато-географические и погодные), производственные, социально-бытовые, психофизиологические группы рисков.

При работе с классификацией проводились определения климато-географической зоны расположения предприятия, вида его деятельности, профессиональных рисков, присущих ведущим специальностям в соответствии с официальными документами. При определении социально-бытовых, психофизиологических рисков учитывались удаленность объекта от основной инфраструктуры, применение вахтового метода.

Классификация была несколько модифицирована с учетом практических задач. В частности, группа производственных рисков, обычно понимаемых как совокупность неблагоприятных для здоровья физических, химических, биологических факторов и факторов напряженности труда, была разделена на собственно производственные и техногенные риски, отличающиеся по своей природе, проявлениям, последствиям при реализации, мерам предотвращения и снижения рисков. Важнейшим принципом отнесения риска в той или иной подгруппе являлось их неотъемлемое присутствие при правильно, безукоризненно организованных условиях труда (производственный) либо возможность их реализации только при нарушениях производственного процесса (техногенный) [12].

Еще одна дополнительная группа рисков была обозначена как «медицинские риски», к которым были отнесены объективные и субъективные дефекты организации и оказания медицинской помощи, включая ее доступность, обеспеченность здравпунктов оборудованием и медикаментами, укомплектованность медицинским персоналом, возможность проведения медицинской эвакуации в адекватные сроки, наличие подтвержденных фактов некачественного оказания медицинской помощи и др. Был использован известный подход к оценке качества медицинской помощи и медицинского обеспечения в целом, включающий определение качества результата, процесса и ресурсов. Медицинские риски введены как особая группа ввиду того, что состояние здоровья персонала, система отбора и медосмотров, состояние системы медицинского обеспечения и профилактической работы являются самостоятельными факторами, способными оказать

как положительное, так и отрицательное влияние на здоровье работников. Источниками получения информации по ним являются отчеты предприятий, которые подвергались автоматизированной обработке.

Такой подход позволяет интегрировать разработанный программный продукт в общекорпоративную систему управления рисками (ОСУР).

В рассматриваемом ниже контексте нами были предложены 2 матрицы:

1) Матрица результатов управления рисками для здоровья (МРУ) позволяет проводить анализ согласно критериям ФЗ № 125-ФЗ от 24.07.1998 г. «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» [13] и руководства Р 2.2.1766-03 «Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки» [14].

2) Матрица ресурсно-процессного управления рисками для здоровья (МПУ), в которой используются индикаторы оценки качества медицинской помощи, изложенные в документах Минздрава России и конкретизированные в соответствии с корпоративными документами компании.

МРУ показывает позицию предприятия в координатах «совокупность рисков» – «уровни заболеваемости и травматизма», т. е. характеризует конечные результаты работы по охране здоровья персонала. МПУ позволяет оценить состояние медицинского обеспечения предприятия, включая кадровые, материально-технические ресурсы здравпунктов, ведение профилактической работы, выполнение рекомендаций медосмотров и т. д. При этом обе матрицы имеют по оси ординат единую шкалу оценки рисков, что позволяет наглядно сопоставить полученные результаты.

Система позволяет отобразить динамику показателей предприятий за исследуемый период времени (обычно – год), в этом режиме графически представляется информация об изменении положения предприятий в той же системе координат.

Для возможности наглядного представления о ситуации по управлению рисками для здоровья работников, а также для качественного описания положения предприятия одним числом, на Матрицу накладывается условная сетка, позволяющая вычислить рейтинг каждой графо-клетки.

Условно на Матрице выделяются 4 зоны:

- зеленая – нормальные показатели;
- желтая – пограничные показатели;
- оранжевая – относительное неблагополучие;
- красная – абсолютное неблагополучие.

Границы зон расположены по диагонали от нижнего левого угла (зеленая зона) до верхнего правого (красная зона).

При этом каждая графо-клетка получает уникальный номер – число, получаемое при перемножении значений по ординате и абсциссе. Это позволяет установить численные границы зон и описать положение каждого предприятия одним числом, выстроить предприятия по рейтингу и т. д.

Выбранный подход позволяет оперативно получить три части заключения о ситуации по управлению рисками для здоровья, необходимые для принятия управленческих решений:

- 1) нахождение предприятия в той или иной зоне матрицы;
- 2) динамическая траектория по годам или иным временным интервалам;
- 3) состояние кадровых и материально-технических ресурсов медицинского обеспечения.

При необходимости можно оперативно провести углубленный автоматизированный анализ по первичным факторам, что позволяет оценить причины неблагоприятной динамики и выбрать оптимальную адресную траекторию для коррекции ситуации на конкретном предприятии на основе заочного аудита системы медицинского обеспечения.

Для обеспечения возможности количественной оценки каждой группы рисков экспертным путем были определены доступные и поддающиеся оценке показатели, значения которых могут быть получены с оперативностью, позволяющей оценивать, анализировать динамику рисков и эффективность системы управления ими. В целях единообразия при расчетах показателей выбрана интуитивно понятная пятибалльная шкала, при этом минимальное значение риска равно одному баллу, максимальное значение – пяти баллам. В некоторых шкалах при отсутствии риска предусмотрено нулевое значение.

Весовые коэффициенты позволяют определить «вклад» каждого фактора риска в суммарный уровень риска в группе. Вес (рейтинг) каждой группы рисков, ее вклад в интегральный показатель был определен экспертным методом. В качестве экспертов были привлечены члены научного коллектива, сотрудники управления личного страхования компании и менеджеры, непосредственно осуществляющие управление рисками для здоровья на предприятиях. Полученные экспертным путем значения весовых коэффициентов были проанализированы, и конечный результат рассчитан как их среднее арифметическое.

В обеих матрицах по оси ординат заносится **Интегральный показатель риска (ИПР)**, который является суммой групповых рисков

$$\text{ИПР} = a_1 \cdot \text{ПР1} + a_2 \cdot \text{ПР2} + a_3 \cdot \text{ПР3} + a_4 \cdot \text{ПР4} + a_5 \cdot \text{ПР5} + a_6 \cdot \text{ПР6}, \quad (1)$$

где ПР1 – производственные риски, ПР2 – психологические риски, ПР3 – климато-географические риски, ПР4 – социально-бытовые риски,

ПР5 – психологические риски, ПР6 – медицинские риски; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – весовой коэффициент соответствующей группы риска.

При этом ПР1 (производственные риски) определены через средний показатель по основным профессиям для различных групп предприятий (согласно "Руководству по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки", руководству Р 2.2.1766-03 по перечню профессий согласно Постановлению Госкомтруда СССР Президиума ВЦСПС от 25-10-74 298П-22 (ред от 29-05-91) (актуально в 2020 году). «Об утверждении списка производств.... Раздел IX. Нефтяная и газовая промышленность» [15] и др.).

Матрица результатов управления рисками строится в координатах «Интегральный показатель рисков» (ИПР) – «интегральный показатель управления медицинскими рисками» (ИПУ).

Отличия Матрицы процессов управления рисками состоят в том, что по оси абсцисс отображается не интегральный показатель результатов управления медицинскими рисками (ИПУ), а интегральный показатель ресурсов и процессов системы медицинского обеспечения (ИПРП).

Оценка результатов управления рисками для здоровья проводится по конечным результатам, в качестве которых рассматриваются предотвращение и снижение заболеваемости и травматизма персонала.

Оценка результатов управления рисками для здоровья определяется по 4 базовым критериям:

- заболеваемость с временно утратой трудоспособности (ВУТ);
- профессиональная заболеваемость;
- бытовой травматизм;
- производственный травматизм.

Изначально для каждого предприятия рассчитываются показатели по каждому критерию:

- заболеваемость с ВУТ – количество дней на 100 работников (ПКР1);
- травматизм бытовой – количество дней на 100 работников (ПКР2);
- травматизм производственный – количество случаев на 100 работающих (ПКР3);
- профессиональная заболеваемость – абсолютное число случаев (ПКР4).

Для каждого компонента экспертным путем определяется весовой коэффициент (соответственно – k_1, k_2, k_3 и k_4).

Полученная сумма сводится в **Интегральный показатель управления (ИПУ)**, который вносится в Матрицу по оси абсцисс по каждому предприятию

$$\text{ИПУ} = k_1 \cdot \text{ПКР1} + k_2 \cdot \text{ПКР2} + k_3 \cdot \text{ПКР3} + k_4 \cdot \text{ПКР4}. \quad (2)$$

В результате Матрица графически представлена в виде таблицы, на которой по оси ординат отображается интегральный показатель рисков (ИПР), а по оси абсцисс – интегральный показатель управления (ИПУ). На пересечении ИПР и ИПУ отображается актуальное состояние каждого из анализируемых предприятий.

Сетка матрицы состоит из 5 зон по каждой из координат, соответствующих очень низкому, низкому, среднему, высокому и очень высокому значению ИПР и ИПУ. Это позволяет наглядно представить принадлежность каждого предприятия к определенной зоне.

Второй тип Матрицы позволяет оценить управление рисками с точки зрения ресурсов и процессов медицинского обеспечения. В этом случае по оси ординат используется тот же ИПР, а по оси абсцисс – **Интегральный показатель ресурсов и процессов (ИПРП)**, источником сведений для которого являются отчеты предприятий по типовой форме. Из отчетов выбираются данные о ресурсах здравпунктов, показателях медицинских осмотров, дефектах оказания экстренной и плановой медицинской помощи на этапах, санаторно-курортном лечении, мероприятиях по здоровому образу жизни (ЗОЖ). Все эти данные переводятся в рейтинговые показатели, которые и образовывали ИПРП.

В отличие от предыдущей, данная матрица наглядно показывает соотношение рисков для здоровья и усилий предприятий компании по их предотвращению и коррекции через систему медицинского обеспечения.

Порядок применения матричного метода включает:

- получение структурированных отчетов предприятий с фиксированным перечнем показателей;
- внесение показателей в базу данных для обработки при помощи оригинальной программы построения матриц;
- автоматическое преобразование показателей в балльные значения в соответствии с ранее заданными диапазонами;
- собственно построение матриц;
- оценка позиций предприятий, выбор проблемных объектов для углубленного анализа;
- построение траекторий проблемных предприятий по годам наблюдений;
- углубленный анализ отчетов предприятий, находящихся в «оранжевой» зоне, выявление причин неблагоприятной динамики;
- разработка мероприятий по адресному совершенствованию медицинского обеспечения.

Результаты и обсуждение

Разработанная методика была применена для анализа состояния здоровья и оценки системы

медицинского обеспечения на 49 предприятиях, расположенных во всех климатических зонах России и относящихся к нефтедобывающим, нефтеперерабатывающим предприятиям, сервисным и научным организациям, предприятиям сбыта нефтепродуктов с общей численностью работников более 120 тысяч человек. На этих предприятиях мониторинг проводился в течение 3 лет. По данным анализа МРУ в разные годы число предприятий, находящихся в «зеленой» зоне (0–25 балла), составляло 18–21, в «желтой» зоне (26–50 баллов) – 22–26, в «оранжевой» (51–75 баллов) – 6–8 предприятий, в «красной» зоне (76–100 баллов) – предприятий не было.

В МПУ в «зеленой» зоне состояло 5–7 предприятий, в «желтой» зоне – 35–39, в «оранжевой» – 6–8, в «красной» зоне предприятий также не было.

Особое внимание уделялось предприятиям, находящимся в «оранжевой» зоне. Всего за 3 года в оранжевой зоне МРУ было хотя бы однократно зарегистрировано 10 предприятий, в оранжевой зоне МПУ – 9 предприятий, при этом 4 нефтедобывающие предприятия – в оранжевых зонах обеих матриц.

По каждому из них был проведен углубленный анализ. Первый этап включал построение МРУ и МПУ по этим предприятиям. На втором этапе проводился аудит всех составляющих системы медицинского обеспечения, данные о которых также могли быть загружены из базы данных, включая сведения о кадровом составе здравпунктов, прохождении врачами и средним медицинским персоналом курсов усовершенствования и корпоративных телемедицинских тренингов, состоянии материально-технической базы здравпунктов на соответствие корпоративным стандартам, наличии санитарного автомобиля и возможностей санитарной авиации, о зафиксированных дефектах при оказании медицинской помощи и т. д. с последующей разработкой и реализацией плана коррекции выявленных недостатков.

Разработанная система в течение 3 лет используется в компании, насчитывающей несколько десятков предприятий, расположенных в различных климатических зонах и на территории 9 субъектов Федерации.

Построение матриц рисков для здоровья позволяет оперативно проводить мониторинг рисков на уровне предприятий и в этом отношении является новым методом оценки рисков с использованием ИТ-решений, направленных на интеграцию управления рисками для здоровья в ОСУР, а также способствует повышению качества отчетности по каждой категории рисков.

Внедрение матричного метода позволило кардинально ускорить процессы обработки информации по большому количеству объектов, что способствует

оперативному принятию решений по конкретным предприятиям.

Выводы

1. Охрана здоровья работников нефтяной промышленности является актуальной проблемой ввиду широкого спектра рисков для здоровья различной природы, сопутствующих большинству профессий отрасли.

2. Территориальная разобщенность отдельных предприятий применительно к дивизиональной структуре крупных компаний (ведущих деятельность в различных, в том числе отдаленных регионах, в сочетании с системой медицинского обеспечения, построенной на аутсорсинге медицинских услуг) объективно требуют инновационных подходов к методам координации, контроля и оценки качества медицинской помощи и ее результатов.

3. Одним из инструментов контроля качества оказания медицинской помощи может быть подход, построенный на автоматизированной обработке ключевых показателей заболеваемости и деятельности медицинской инфраструктуры, позволяющий анализировать большие объемы информации по многим объектам.

4. Применение матричного метода позволяет наглядно представить информацию, проводить пообъектный мониторинг деятельности компании в области охраны здоровья на основе интегральных показателей, идентифицировать проблемные ситуации и принимать адресные решения на основе углубленного анализа информации, содержащейся в отчетах предприятий.

Список литературы

1. Аристархов А.Л. Применение аутсорсинга в повышении конкурентоспособности нефтедобывающего предприятия // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. / Серия: общественные науки. Экономика. 2007. № 4. С. 40–45.

Aristarkhov A.L. Application of outsourcing in increasing the competitiveness of an oil-producing enterprise // News of higher educational institutions. Volga region / Series: Social Sciences. Economy. 2007. № 4. P. 40–45.

2. En-lin Li: Economic Influence Analysis of Offshore Outsourcing Based on Host Country's View. International Journal of U - and E- Service. Science and Technology. 2014. 7(3). 63–72.

3. Бушманов А.Ю., Калинина М.Ю., Кретов А.С., Мамонова Е.Ю., Власова И.В., Уйба В.В. Экономические аспекты проведения телемедицинских тренингов в условиях аутсорсинга медицинских услуг. Саратовский научно-медицинский журнал 2016; 12 (4): 645–648.

Bushmanov A.Yu., Kalinina M.Yu., Kretov A.S., Mamonova E.Yu., Vlasova I.V., Uiba V.V. Economic aspects

of telemedicine training in the conditions of medical services outsourcing. *Saratov journal of medical science*. 2016. 12 (4). 645–648.

4. Кадыров Ф.Н., Хайруллина И.С. Аутсорсинг в здравоохранении. Часть 1. Менеджер здравоохранения. М., 2009. (8). 58–65.

Kadyrov F.N., Khairullina I.S. Outsourcing in healthcare. Part 1. Health Manager. 2009. (8). 58–65.

5. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683.

«The Labor code of the Russian Federation» from 30.12.2001 N 197-FZ (ed. from 24.06.2020) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683.

6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 5-е изд. М., 2004. 560 с.

Gantmacher F.R. Theory of matrices. 5th ed. Moscow, 2004. 560 p.

7. Богоявленский С.Б. Управление риском в социально-экономических системах. СПб., 2010. 147 с.

Bogoyavlensky S.B. risk Management in socio-economic systems. Saint Petersburg, 2010. 147 p.

8. Стандарт по управлению рисками Нефтегазовой компании «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.» URL: <http://www.sakhalinenergy.ru/media/library/ru/forcontractors/procedures/Appendix%20-%20Risk%20Assessment%20Matrix%20Specification%20Rus.pdf>

Risk management Standard of the Sakhalin energy investment company Ltd. URL: <http://www.sakhalinenergy.ru/media/library/ru/forcontractors/procedures/Appendix%20-%20Risk%20Assessment%20Matrix%20Specification%20Rus.pdf>

9. Методика выявления, оценки и минимизации рисков в области промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды Газпром – ПХГ, М., 2011. 29 с. URL: [https://ugs.gazprom.ru/d/textpage/6a/106/metodika-otsenki-riska-\(pkhg\)_novaya-redaktsiya.pdf](https://ugs.gazprom.ru/d/textpage/6a/106/metodika-otsenki-riska-(pkhg)_novaya-redaktsiya.pdf)

Methods of identification, assessment and minimization of risks in the field of industrial safety, labor protection and the environment Gazprom-UGS, Moscow, 2011, 29 p. URL: [https://ugs.gazprom.ru/d/textpage/6a/106/metodika-otsenki-riska-\(pkhg\)_novaya-redaktsiya.pdf](https://ugs.gazprom.ru/d/textpage/6a/106/metodika-otsenki-riska-(pkhg)_novaya-redaktsiya.pdf)

10. ГОСТ 33433-2015 Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200127759>

GOST 33433-2015 functional Safety. Risk management in railway transport. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200127759>

11. ГОСТ 12.0.003-2015. «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 г. № 602-ст). - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>

GOST 12.0.003-2015. «The interstate standard. Occupational safety standards system. Dangerous and

harmful production factors. Classification» (it is commissioned by Order Rosstandart from 09.06.2016 N 602-st). - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>

12. Орлов О.И., Мамонова Е.Ю., Леванов В.М., Переведенцев О.В., Черногоров Р.В. Функциональный подход к группировке профессиональных рисков для здоровья // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 1. С.54–48.

Orlov O.I., Mamonova E.Yu., Levanov V.M., Perevedentsev O.V., Chernyarov R.V. Functional approach to grouping occupational health risks // Aerospace and environmental medicine. 2019. Vol. 53. No. 1. P. 54–48.

13. Федеральный закон от 24.07.1998 N 125-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19559.

The federal law 24.07.1998 N125-FZ (from 29.07.2017) «About obligatory social insurance from accidents on manufacture and occupational diseases». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19559].

14. Р2.2.1766-03.2.2. «Гигиена труда. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. Руководство» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 24.06.2003) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130907/.

R2.2.1766-03.2.2. «Occupational Health. Guidelines for assessing occupational health risks for employees. Organizational and methodological bases, principles and evaluation criteria. Manual.» (approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation 24.06.2003) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130907/.

15. Постановление Госкомтруда СССР и Президиума ВЦСПС от 25.10.74 298П-22 (ред. от 29.05.91) «Об утверждении списка производств...» (раздел IX. Нефтяная и газовая промышленность») URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=20630>.

Resolution of the state Committee of labor of the USSR and the Presidium of the vtssps of 25.10.74 298P-22 (ed. from 29.05.91) «On approval of the list of productions...» (section IX. Oil and gas industry»). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=20630>.

Поступила 03.11.2023

USING THE MATRIX METHOD FOR ASSESSING THE INCIDENCE AND MEDICAL SUPPORT EFFICIENCY OF INDUSTRIAL WORKERS IN LARGE OIL COMPANIES

Orlov O.I., Mamonova E.Yu.,
Perevedentsev O.V.

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Staff health protection is an integral part of the corporate social policy of oil companies organized on a divisional basis. A medical support system based on outsourcing requires an effective system for monitoring its functioning. Since it includes dozens of objects, such control is possible only when using digital technologies. The matrix method of information representation was chosen for the implementation of the task.

Two matrices were developed: the health risk management results Matrix and the health risk resource and process management Matrix. System was developed for quantitative risk assessment, key indicators, processes and outcomes of medical support personnel for each group of indicators selected a five-point scale by experts determined the weights for each factor.

The developed methodology was applied to analyze the state of health and evaluate the medical support system at 49 enterprises. Special attention was paid to enterprises located in the «orange» zone of relative disadvantage (51-75 points). For three years of observations, 9-10 enterprises were registered in it, with 4 enterprises in both matrices. Based on the analysis of reports, a set of measures to correct the situation for specific enterprises was developed. Conclusion. Building health risk matrices using information technology allows you to monitor a significant number of enterprises, quickly obtain information, identify problem situations and make targeted management decisions.

Key words: medical support system, oil industry, risk-oriented management in healthcare, health risks, matrix method, medical information systems.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 111–117.

УДК 612.062

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ОРТОСТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Котов А.Н., Катунцев В.П., Сухоставцева Т.В., Баранов В.М.

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

E-mail: vpkat@yandex.ru

Для оценки уровня ортостатической устойчивости организма человека предложен и использован количественный показатель, рассчитываемый как отношение величины систолического артериального давления (САД) к частоте сердечных сокращений (ЧСС). Этот показатель условно обозначен как коэффициент эффективности (КЭ) механизмов поддержания системного АД при проведении пассивной ортостатической пробы. Он измеряется в условных единицах и рассчитывается по формуле $KЭ (ул. ед.) = САД (мм рт. ст.) / ЧСС (уд/мин)$.

С целью проверки информативности этого показателя при оценке ортостатической устойчивости проведен ретроспективный анализ 118 ортостатических проб, выполненных до и после гипокинезии различной продолжительности при участии в качестве обследуемых лиц 30 практически здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 19 до 40 лет. В горизонтальном положении до ортопробы величина КЭ составляла $1,88 \pm 0,04$ усл. ед. При ортопробе значения КЭ снижались до $1,3-0,95$ усл. ед., отчетливо отражая степень изменения параметров функционирования сердечно-сосудистой системы и уровень различной переносимости обследуемыми ортостатических воздействий. При более высоком напряжении функционирования сердечно-сосудистой системы и сниженной переносимости ортовоздействия, что наблюдалось в группах обследуемых лиц после гипокинезии, значения КЭ были достоверно ниже, чем в группе с высокой ортостатической устойчивостью до гипокинезии. Анализ индивидуальных реакций показал, что снижение величины КЭ до 1 усл. ед. соответствовало стадии появления первых признаков преколлаптоидного состояния и указывало на необходимость срочного прекращения ортостатического теста ввиду надвигающегося коллапса. Результаты проведенных исследований позволяют рассматривать показатель КЭ как информативный объективный критерий, отражающий уровень ортостатической устойчивости организма человека, и рекомендовать этот показатель к использованию в практике авиакосмической медицины.

Ключевые слова: ортостатическая устойчивость, гипокинезия, коэффициент эффективности.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 118–125.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-118-125

Исследование ортостатической устойчивости человека проводится в целом ряде областей медицины для оценки особенностей функционирования сердечно-сосудистой системы у здоровых людей и пациентов с различной патологией [1]. Нарушения ортостатической устойчивости могут проявляться как в относительно мягких формах – головокружении, побледнения кожных покровов, повышенной потливости, тошноты, так и в тяжелой форме – в виде обморока. Эти симптомы появляются на фоне повышения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и снижения систолического и пульсового артериального давления (АД) в ответ на ортостатическое воздействие [2–4].

Для оценки переносимости человеком постуральных воздействий используют так называемую ортостатическую пробу: изменение положения тела из горизонтального в вертикальное и пребывание в этом положении в течение определенного времени [1–3, 5] – и (или) тест с приложением отрицательного давления к нижней части тела [2, 6–8].

Протоколы ортостатической пробы (вид, продолжительность, угол наклона и т. п.) определяются целью исследования и спецификой обследуемого контингента (пациенты, спортсмены, летчики, космонавты и др.) [5, 9]. Существуют 2 вида ортостатической пробы: активная и пассивная [5, 10]. При выполнении активной пробы обследуемый самостоятельно изменяет положение тела относительно вектора гравитации. При выполнении пассивной пробы обследуемого, находящегося на специальном поворотном столе (вертикализаторе) в положении лежа на спине, обслуживающий персонал переводит из горизонтального в вертикальное положение, без его активного участия. Имеются различия в физиологических реакциях организма на способ изменения положения тела. При пассивной пробе оценивается в основном результат гидростатических сдвигов в сосудистой системе, обусловленных гравитационными перемещениями крови, а в случае активной пробы судят о способности «мышечного насоса» преодолевать последствия гидростатического эффекта. Ортостатическая проба успешно применяется для оценки степени устойчивости

гемодинамики на изменение положения тела при гипокинезии, мышечной работе, после космических полетов, служит нагрузочным тестом при экспертизе трудоспособности в авиационной медицине.

Поскольку ведущей физиологической системой, определяющей адаптационные возможности организма, является сердечно-сосудистая система, наблюдаемые в процессе ортопробы сердечно-сосудистые сдвиги часто используют для оценки функциональных резервов организма [11]. В 1967 г. В.В. Париным и соавт. [12] изложена концепция о сердечно-сосудистой системе как индикаторе межсистемных адаптивных реакций организма.

Попытки представить состояние сердечно-сосудистой системы человека в виде интегрального показателя и использовать этот показатель для оценки здоровья и функциональных резервов организма предпринимались неоднократно. Так, для оценки уровня функционирования системы кровообращения и определения ее адаптационных возможностей предложен определяемый в баллах индекс функциональных изменений (ИФИ). Для вычисления ИФИ требуются данные о частоте пульса, АД, росте, возрасте и массе тела [11]. В спортивной медицине для оценки функциональных возможностей миокарда нередко используется индекс Робинсона (ИР) [13]. Этот показатель рассчитывается по формуле $ИР = ЧСС \cdot сист. АД / 100$. Считается, что в покое у спортсменов ИР ниже, а на высоте нагрузки выше, чем у нетренированных лиц, что отражает более экономичную работу сердца спортсменов в покое и более высокие функциональные резервы тренированных лиц при физическом напряжении. Для оценки функционального состояния вегетативной нервной системы, в частности соотношения возбудимости ее симпатического и парасимпатического отделов на основе данных диастолического АД и ЧСС, применяется разработанный Кердо вегетативный индекс [14].

Следует отметить, что ортостатическое тестирование непосредственно адресовано к механизмам регуляции кровообращения и, в отличие от физических нагрузок, практически не отражается на энергетических и метаболических процессах в организме [15]. К сожалению, регистрируемые во время ортопробы такие объективные параметры, как АД и ЧСС, как, впрочем, и другие показатели гемодинамики, не позволяют количественно оценить возможности сердечно-сосудистой системы поддерживать адекватный уровень гемодинамики в вертикальном положении. В работе [16] для сравнения ортостатической устойчивости астронавтов, выполнявших короткие космические полеты по программе Space Shuttle и продолжительные на Международной космической станции (МКС), был использован взвешенный индекс (W), включавший диастолическое АД (DBP) и ударный объем сердца (SV);

$W = 0,204 \cdot DBP + 0,0944 \cdot SV$. Ретроспективный анализ 196 ортопроб с участием 85 астронавтов позволил авторам с помощью W-индекса установить, что доля астронавтов, летавших на МКС и выполнивших полностью тилт-тест после космического полета, была меньше, чем соответствующая часть астронавтов, совершивших полеты на космических кораблях Space Shuttle. Сложность расчета W-индекса при его использовании в режиме on-line явилась одной из причин для изыскания более простого количественного показателя, информативного для оперативной оценки результатов выполнения экспертных ортостатических проб.

При выборе и обосновании такого показателя мы исходили из положения о том, что ведущим механизмом, ответственным за контроль и поддержание системного АД при постуральных воздействиях, является барорефлекторный механизм, афферентным звеном которого являются артериальные (синартериальные и аортальные) и сердечно-легочные барорецепторы [17].

Как известно, уменьшение ударного объема сердца и сердечного выброса, происходящее у здорового человека при переходе из горизонтального в вертикальное положение, компенсируется барорефлекторным механизмом путем увеличения ЧСС и периферического сопротивления сосудов путем активации вазоконстрикции [1]. В случае снижения активности барорефлекторного механизма [3, 18, 19] может наблюдаться снижение АД, приводящее к уменьшению церебрального кровотока и развитию ортостатического коллапса [20].

Основываясь на этих представлениях о регуляции АД, для оценки степени напряжения сердечно-сосудистой системы при ортостатической пробе и уровня ортостатической устойчивости мы посчитали возможным использовать более простой показатель, рассчитываемый как отношение величины систолического АД к ЧСС. Этот показатель был условно обозначен как коэффициент эффективности (КЭ) механизмов поддержания адекватного системного АД при проведении ортостатической пробы. Он измеряется в условных единицах и рассчитывается по формуле $КЭ (усл. ед.) = сист. АД (мм рт. ст.) / ЧСС (уд/мин)$. С целью проверки информативности этого показателя при оценке ортостатической устойчивости нами был проведен ретроспективный анализ ортостатических проб, выполненных до и после антиортостатической (АНОГ) и ортостатической гипокинезии (ОГ) продолжительностью от 1 до 21 сут, результаты которого представлены в данной работе.

Методика

В качестве испытуемых в работе приняли участие 30 практически здоровых мужчин-добровольцев в

возрасте от 19 до 40 лет (средние значения возраста – $25,4 \pm 1$ год; массы тела – $75,9 \pm 1,9$ кг; длины тела – $179,5 \pm 1,1$ см), успешно прошедших врачебно-экспертную комиссию, ознакомленных с программой исследования и подписавших добровольное Информированное согласие на участие в экспериментах с АНОГ и ОГ. В качестве АНОГ использовали антиортостатическую гипокинезию под углом наклона тела -6° и -15° по отношению к горизонту; в качестве ОГ – ортостатическую гипокинезию под углом наклона тела $+9,6^\circ$ по отношению к горизонту. Программа исследований, в рамках которых проводились эксперименты с АНОГ и ОГ, была одобрена Комиссией по биомедицинской этике ФГБУ ФНКЦ ФМБА России (протокол № 2 от 16.04.2019 г.). За 2 сут до начала экспериментов и проведения фоновых исследований испытуемых помещали в условия стационара. В этот период они находились под наблюдением медицинского персонала на спокойном двигательном режиме и получали стандартный 4-разовый рацион питания.

Ортостатические пробы были проведены на вертикализаторе Erigo®ProHocoma (Hocoma AG, Швейцария) путем перевода испытуемых в вертикальное положение с углом наклона тела $+70^\circ$ максимум на 20 мин в день перед началом гипокинезии и сразу после ее завершения в одни и те же утренние часы через ~ 2 ч после легкого завтрака в хорошо вентилируемом помещении при температуре окружающего воздуха $21-22^\circ\text{C}$.

До начала ортостатического воздействия, на каждой нечетной минуте ортопробы, а также после ее завершения при использовании монитора PVM-2703 (Nihon Kohden Corporation, Япония) проводили регистрацию ЧСС, систолического АД, диастолического и среднего АД. Осуществляли постоянный врачебный контроль за общим состоянием здоровья испытуемых. Физиологические показатели перед и после ортопробы регистрировали в горизонтальном положении испытуемых. Показанием для преждевременного прекращения ортопробы являлось прогрессивное снижение АД, появление головокружения, тошноты, повышенной потливости, ощущения «пелены перед глазами», брадикардия и другие признаки развивающегося обморочного состояния.

Математическую обработку полученных данных осуществляли с использованием программы IBM SPSS Statistics. Статистическую значимость различий определяли с помощью моделей анализа по Вилкоксоу для определения значимости внутригрупповых изменений и Манна – Уитни для оценки различий между группами. В тексте и на рисунках результаты исследований представлены в виде $M \pm m$. Различия считали статистически достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Исследованиями многих авторов установлено, что пребывание человека в условиях микрогравитации, «сухой» иммерсии, АНОГ и ОГ приводит к снижению ортостатической устойчивости организма [3–5, 8, 16, 18, 20, 21] в результате развивающейся детренированности антигравитационных механизмов, ответственных за поддержание вертикальной позы в условиях земной гравитации [2]. Для изучения характера изменений величины КЭ при разном уровне переносимости человеком ортостатической пробы в настоящей работе было использовано гипокинетическое воздействие.

Из имеющейся базы наземных модельных исследований нашей лаборатории были отобраны и проанализированы результаты 118 пассивных ортостатических проб – 59 до начала гипокинезии и 59 после ее завершения. До воздействия гипокинезии (1-я группа исследований) все 59 ортопроб были выполнены в полном объеме при хорошем самочувствии испытуемых и отсутствии у них ортостатических нарушений. После гипокинезии 40 из 59 ортопроб были выполнены также в полном объеме при хорошем самочувствии испытуемых и отсутствии ортостатических нарушений (2-я группа исследований), а 19 других ортопроб завершены досрочно ввиду развития у испытуемых преколлаптоидного состояния (3-я группа исследований).

В исследованиях 1-й группы, проведенных до гипокинезии, поддержание стабильного уровня систолического АД ($124,1 \pm 1,3$ мм рт. ст.) при ортостазе обеспечивалось увеличением ЧСС в среднем на $44,8\%$, с $66,4 \pm 1,5$ до $94,6 \pm 1,7$ уд./мин ($p < 0,01$), повышением диастолического АД на $15,5\%$, с $66,7 \pm 1,3$ до $77,3 \pm 1,2$ мм рт. ст. ($p < 0,01$) и среднего АД на $7,7\%$ (рис. 1, А–В). Динамика показателя КЭ при ортопробе (см. рис. 1, Г) напоминала инвертированную картину изменения ЧСС (см. рис. 1, В). После перевода испытуемых в вертикальное положение на 1-й минуте ортопробы КЭ снижался до $\sim 1,5$ усл. ед. и затем к концу пробы постепенно опускался до $1,24$ усл. ед. ($p < 0,01$).

Во 2-й группе с полным выполнением программы ортостатических тестов после гипокинезии по сравнению с контрольной группой до гипокинезии наблюдалось небольшое (на $1,9\%$), но достоверное снижение систолического АД (с $125 \pm 1,5$ до $122,6 \pm 1,3$ мм рт. ст.) при более выраженном (на 53%) компенсаторном повышении ЧСС с $68,7 \pm 1,8$ до $105 \pm 2,2$ уд./мин, повышении диастолического АД с $68,9 \pm 1,4$ до $76,8 \pm 1,6$ мм рт. ст. на $11,5\%$ и среднего АД на $5,1\%$ (рис. 2, А–В). При этом наблюдались и более значительные изменения величины КЭ: на 1-й минуте ортопробы КЭ снижался до $1,35$ усл. ед. и затем постепенно опускался к концу теста до $1,13$ усл. ед. (см. рис. 1, Г).

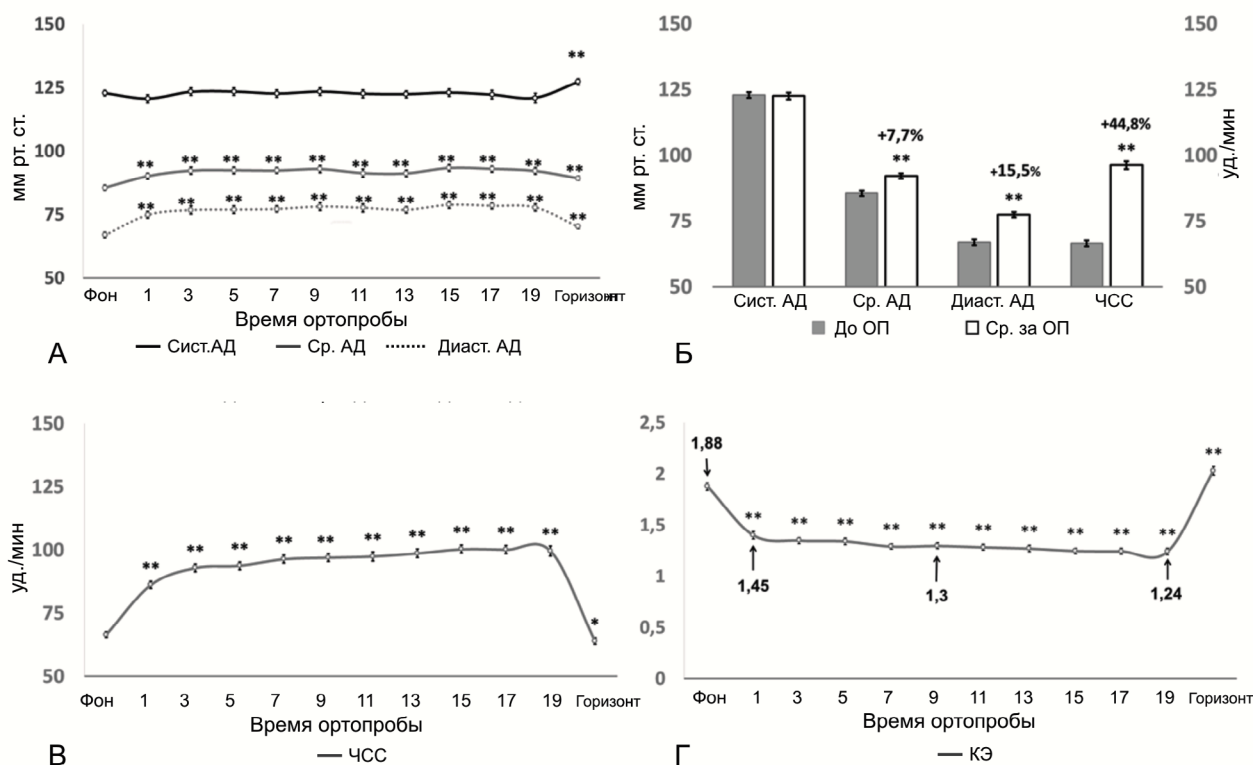


Рис. 1. Динамика показателей АД, ЧСС и КЭ при ортопробе у испытуемых 1-й группы исследований.

Здесь и на рис. 2, 3: сист. АД – систолическое артериальное давление; ср. АД – среднее артериальное давление; диаст. АД – диастолическое артериальное давление; ЧСС – частота сердечных сокращений; ОП – ортопроба; ср. за ОП – среднее значение показателя за ортопробу.

А – динамика сист. АД, ср. АД и диаст. АД; Б – значения сист. АД, ср. АД, диаст. АД и ЧСС до и при ортопробе; В – динамика ЧСС; Г – динамика значений коэффициента эффективности. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ по сравнению с фоновыми значениями до ортопробы

В 3-й группе с преждевременно завершившимися ортопробами на фоне более выраженного повышения (на 60,8 %) ЧСС с $70,9 \pm 2,6$ до $113,6 \pm 4,1$ уд./мин происходило постепенное снижение систолического АД с $125,1 \pm 2,2$ до $112,9 \pm 1,8$ мм рт. ст. ($p < 0,01$). В отличие от 2-й группы отмечалось также снижение уровня среднего АД на 6,6 % при отсутствии компенсаторного увеличения диастолического АД (рис. 3, А–В). После перевода испытуемых в вертикальное положение значение КЭ очень быстро уменьшалось вплоть до 1 усл. ед. и даже ниже к концу ортопробы (см. рис. 3, Г).

Таким образом, воздействие гипокинезии приводило к снижению ортостатической устойчивости обследуемых лиц. На это указывали более выраженные сдвиги со стороны показателей функционирования сердечно-сосудистой системы и 19 случаев досрочного прекращения ортопробы ввиду возникновения у испытуемых симптомов преколлаптоидного состояния на фоне снижения артериального давления. Как свидетельствуют полученные данные, в зависимости от функциональных возможностей сердечно-сосудистой системы при переводе

человека из горизонтального в вертикальное положение происходят соответствующие изменения и показателей гемодинамики. Выполненное исследование еще раз подтверждает, что в процессе эволюции сформировался физиологический механизм, обеспечивающий ежедневную деятельность человека, в процессе которой неоднократно происходит изменение положения тела и, в частности, системы кровообращения относительно вектора силы тяжести. Фундаментальные основы этого механизма не являются предметом данной работы. Тем не менее здесь уместно подчеркнуть, что механизм регуляции кровообращения при изменении положения тела является частным случаем теории П.К. Анохина о функциональных системах [22] и отвечает положениям теории Г.Н. Крыжановского о дисрегуляторной патологии [23]. При высоком уровне функциональных резервов, что наблюдается при проведении ортопробы в исходном состоянии здоровых лиц, ведущими компенсаторными изменениями являются изменения ЧСС. При этом параметры АД изменяются в меньшей степени. При повышении степени напряжения регуляторных

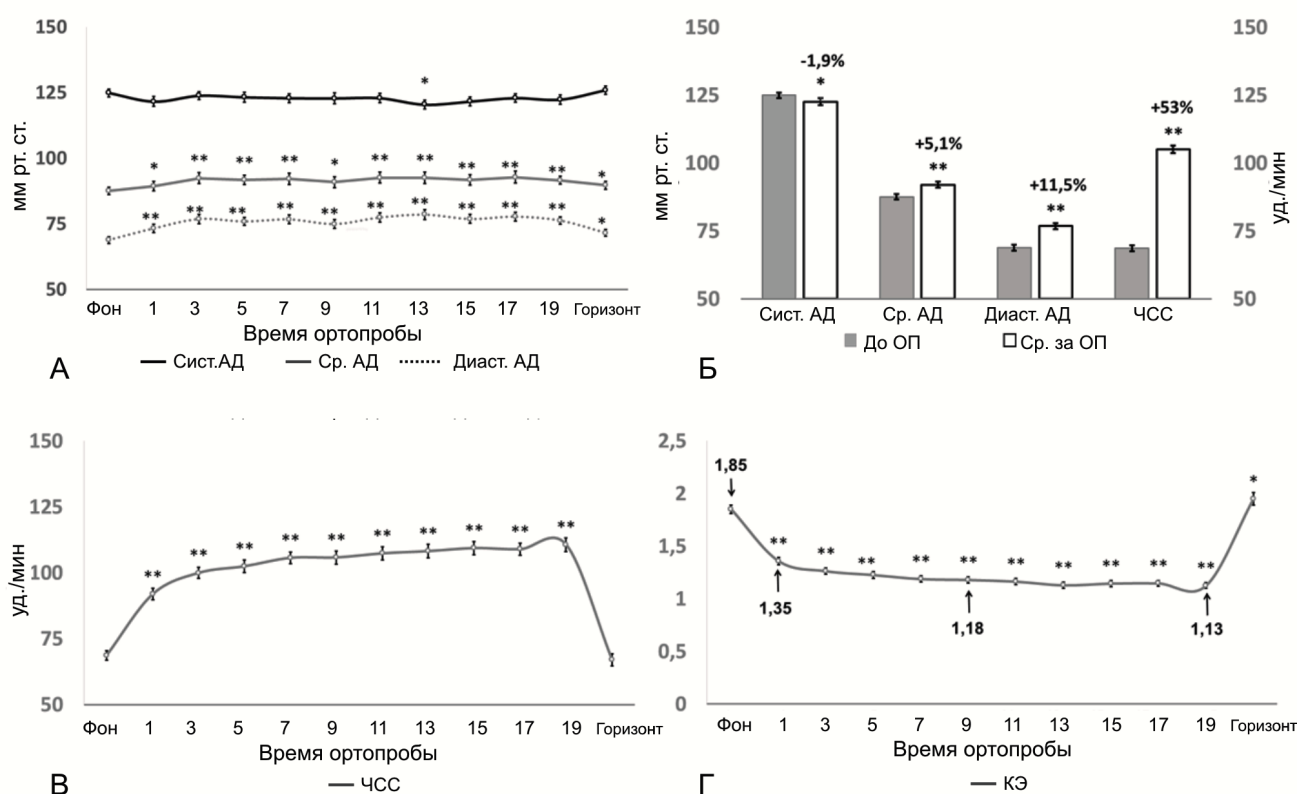


Рис. 2. Динамика показателей АД, ЧСС и КЭ при ортопробе у испытуемых 2-й группы исследований

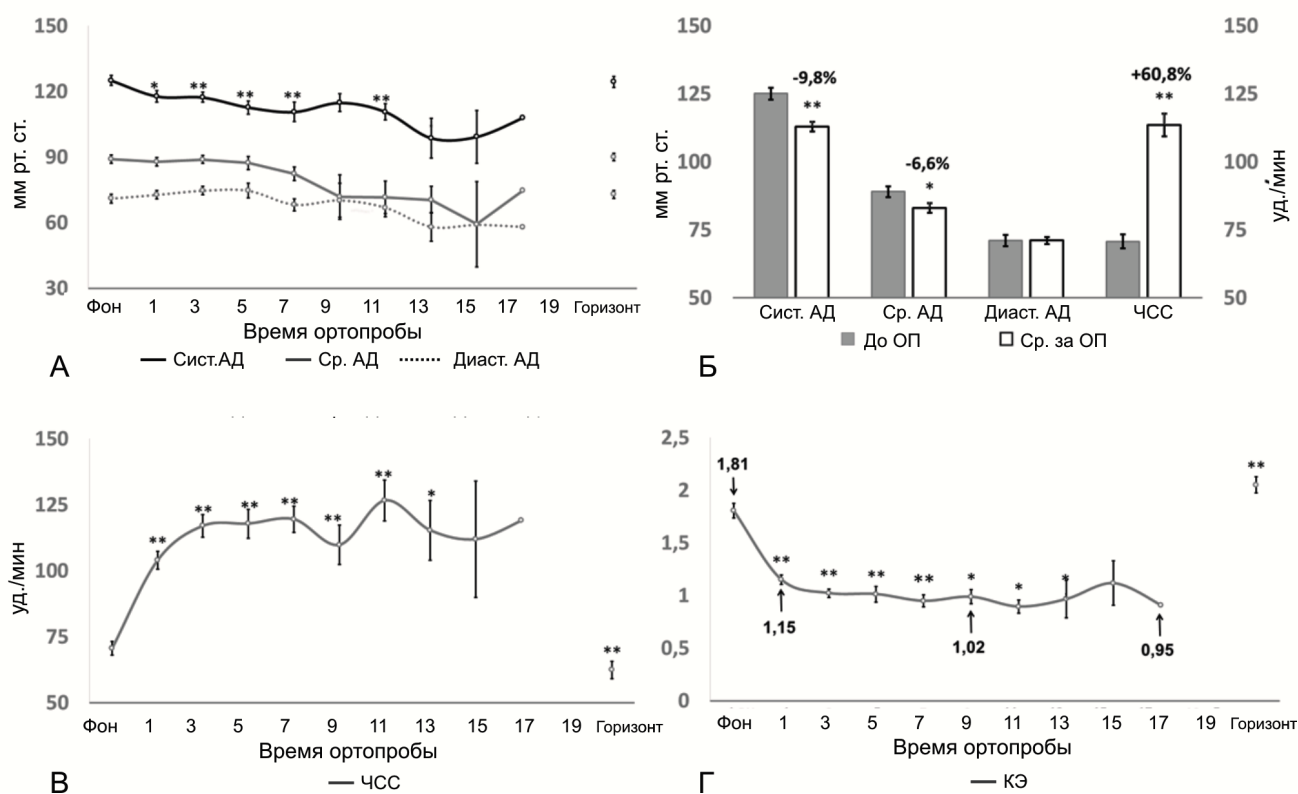


Рис. 3. Динамика показателей АД, ЧСС и КЭ при ортопробе у испытуемых 3-й группы исследований

Сравнение значений КЭ в 1, 2 и 3-й группах исследования

Группа исследования	Значение КЭ перед ортопробой, усл. ед.	Среднее значение КЭ за ортопробу, усл. ед.	Значение КЭ в последнюю минуту ортопробы, усл. ед.
1-я	1,88 ± 0,04	1,3 ± 0,03*	1,24 ± 0,03*
2-я	1,85 ± 0,04	1,19 ± 0,03*,##	1,13 ± 0,03*,#
3-я	1,81 ± 0,07	1,02 ± 0,05*,§	0,95 ± 0,08*,§

Примечание. * – при $p < 0,01$ по сравнению с фоновыми значениями до ортопробы; # – при $p < 0,05$; ## – при $p < 0,01$, различия между группами 1-й и 2-й; § – при $p < 0,01$, различия между группами 2-й и 3-й.

механизмов, что в данном случае достигается воздействием на организм гипокинезии, происходят более значительные изменения АД, вплоть до возможности развития артериальной гипотензии, приводящей к повышенному риску ортостатического коллапса.

В таблице представлены данные по сравнению значений КЭ в выполненных исследованиях.

В положении лежа на спине до ортопробы значения КЭ у испытуемых в 1–3-й группах составляли в среднем от $1,88 \pm 0,04$ до $1,81 \pm 0,07$ усл. ед. Эти значения КЭ достоверно не отличались друг от друга. Однако можно видеть, что абсолютные значения КЭ у испытуемых после гипокинезии были ниже, чем до гипокинезии. Причем в 3-й группе средние значения КЭ ($1,81 \pm 0,07$) были ниже, чем во 2-й ($1,85 \pm 0,04$). Такие данные, очевидно, могли быть обусловлены несколько более высокими исходными значениями ЧСС у испытуемых перед проведением ортопробы после гипокинезии, что соответствует наблюдениям других авторов после космических полетов [16] и экспериментов с АНОГ [24].

Во время ортопробы значения КЭ во всех группах достоверно снижались, отражая степень изменения параметров функционирования сердечно-сосудистой системы. При более высоком напряжении функционирования сердечно-сосудистой системы, что наблюдалось после гипокинезии, значения показателя КЭ (во 2-й и 3-й группах) были существенно ниже, чем в 1-й группе при ортопробе до гипокинезии. Это относилось к значениям КЭ, рассчитанным как среднее за весь период ортопробы, так и к значениям КЭ, рассчитанным за последнюю минуту ортопробы. Причем самому низкому уровню переносимости ортовоздействия (3-я группа) соответствовали и самые низкие значения КЭ, о чем свидетельствовали результаты сравнения величины КЭ во 2-й и 3-й группах. Анализ индивидуальных реакций показал, что снижение величины КЭ до 1 усл. ед. соответствовало стадии появления у испытуемых первых признаков преколлаптоидного состояния и указывало на необходимость срочного прекращения ортостатического теста ввиду надвигающегося коллапса.

Результаты проведенных исследований дают основание рассматривать показатель КЭ как информативный объективный критерий, отражающий степень изменения параметров функционирования сердечно-сосудистой системы при ортопробе, и позволяют рекомендовать этот показатель к практическому использованию при оценке ортостатической устойчивости организма человека. Анализ результатов ортостатической пробы требует от эксперта высокой квалификации и большого опыта. Простота расчета КЭ позволяет быстро определять его величину в любой конкретный момент ортостатического воздействия, контролировать его динамику, проводить экспресс-анализ и при приближении величины КЭ к 1 усл. ед. прекратить тест, не дожидаясь развития преколлаптоидного или коллаптоидного состояния. Последнее обстоятельство является чрезвычайно важным, поскольку повышает эффективность медицинского контроля за безопасностью проведения ортостатической пробы. При этом уменьшается вероятность необоснованного досрочного прекращения теста, что может исказить оценку результата влияния исследуемого фактора на сердечно-сосудистую систему и функциональные резервы организма.

Выводы

1. Для оценки переносимости организмом человека ортостатической пробы предложен количественный показатель КЭ, рассчитываемый как отношение систолического АД (в мм рт. ст.) к ЧСС (уд./мин) и измеряемый в условных единицах.

2. Установлено, что динамика значений КЭ отражает степень изменения параметров функционирования сердечно-сосудистой системы при ортопробе и уровень ортостатической устойчивости человека. Полученные данные указывают на возможность использования этого показателя при оценке ортостатической устойчивости организма после проведения модельных наземных исследований и космических полетов.

3. Снижение величины КЭ до 1 усл. ед. после перевода человека из горизонтального в

вертикальное положение может служить предиктором ортостатического коллапса.

Работа выполнена в соответствии с планом фундаментальных исследований ГНЦ РФ – Института медико-биологических проблем РАН (тема № 63.1).

Список литературы

1. Wieling W., Kaufmann H., Claydon et al. Diagnosis and treatment of orthostatic hypotension // *Lancet Neurol.* 2022. V. 21. P. 734–746.
2. Егоров А.Д. Механизмы снижения ортостатической устойчивости в условиях длительных космических полетах // *Авиакосм. и экол. мед.* 2001. Т. 35. № 6. С. 3–12.
3. Egorov A.D. Mechanisms for reducing orthostatic stability of human during long-duration space flight // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2001. V. 35. № 6. P. 3–12.
4. Barbic F., Heusser K., Minonzio M. et al. Effects of prolonged head-down bed rest on cardiac and vascular baroreceptor modulation and orthostatic tolerance in healthy individuals // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. Article 1061.
5. Vernice N.A., Meydan C., Afshinnekoo E., Mason C.E. Long-term spaceflight and cardiovascular system // *Precision Clinical Medicine.* 2020. V. 3 (4). P. 284–291.
6. Носков В.Б. Ортостатическая толерантность после космических полетов и моделированных воздействий: новые подходы к оценке и профилактике // *Авиакосм. и экол. мед.* 2011. Т. 45. № 2. С. 16–25.
7. Noskov V.B. Orthostatic tolerance following space flights and modeling experiments: new approaches to evaluation and prophylaxis // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2011. V. 45. № 2. P. 16–25.
8. Hyatt K.H., Jacobson L.B., Schneider V.S. Comparison of 70 degrees tilt, LBNP, and passive standing as measures of orthostatic tolerance // *Aviat. Space Environ. Med.* 1975. V. 46. № 6. P. 801–808.
9. Goswami N., Blaber A.P., Hinghofer-Szalkay H., Convertino V.A. Lower body negative pressure: physiological effects, applications, and implementation // *Physiol. Rev.* 2019. V. 99. P. 807–851.
10. Amirova L., Navasiolava N., Rukavishnikov I. et al. Cardiovascular system under simulated weightlessness: head-down bed rest vs. dry immersion // *Front. Physiol.* 2020. V. 11. Article 395.
11. Fitzpatrick A.P., Theodorakis G., Vardas P., Sutton R. Methodology of head-up tilt testing in patients with unexplained syncope // *J. of the Am. College of Cardiol.* 1991. V. 17. № 1. P. 125–130.
12. Finucane C., van Wijnen V.K., Fan C.W. et al. A practical guide to active stand testing and analysis using continuous beat-to-beat non-invasive blood pressure monitoring // *Clin. Auton. Res.* 2019. V. 29. P. 427–441.
13. Григорьев А.И., Баевский Р.М. Концепция здоровья и космическая медицина. М., 2007.
14. Grigoriev A.I., Baevsky R.M. Conception of health and space medicine. Moscow, 2007.
15. Парин В.В., Баевский Р.М., Волков Ю.Н., Газенко О.Г. Космическая кардиология. Л., 1967.
16. Parin V.V., Baevsky R.M., Volkov Yu.N., Gazenko O.G. Space cardiology. Leningrad, 1967.
17. Миллер Л.Л. Спортивная медицина: Учеб. пособие. М., 2015.
18. Miller L.L. Sports medicine: A study guide. Moscow, 2015.
19. Kérdö I. Ein aus Daten der Blutzirkulation kalkulierter Index zur Beurteilung der vegetativen Tonuslage // *Acta Neurovegetativa.* 1966. Bd. 29. № 2. S. 250–268.
20. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М., 1997.
21. Baevsky R.M., Berseneva A.P. Assessment of the adaptive capacity of the body and the risk of developing diseases. Moscow, 1997.
22. Lee S.M.C., Felveson A.H., Stein S. et al. Orthostatic intolerance after ISS and Space Shuttle missions // *Aerospace Med. and Human Perform.* 2015. V. 86. № 12. Section II. P. A54–A67.
23. Kaufmann H., Norcliffe-Kaufmann L., Palma J.-A. Baroreflex dysfunction // *N. Engl. J. Med.* 2020. V. 382. P. 163–178.
24. Convertino V.A., Doerr D.F., Eckberg D.L. et al. Head-down bed rest impairs vagal baroreflex responses and provokes orthostatic hypotension // *J. Appl. Physiol.* 1990. V. 68. № 4. P. 458–464.
25. Орлова Е.А., Тарасова О.С., Сонькин В.Д., Боровик А.С. Влияние возраста на барорефлекторную синхронизацию артериального давления и частоты сердечных сокращений при пассивной ортопробе // *Авиакосм. и экол. мед.* 2021. Т. 55. № 1. С. 46–50.
26. Orlova E.A., Tarasova O.S., Son'kin V.D., Borovir A.S. Influence the age on baroreflex synchronization of arterial pressure and heart rate during the passive standing test // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2021. V. 55. № 1. P. 46–50.
27. Blaber A.P., Goswami N., Bondar R.L., Kassam M.S. Impairment of cerebral blood flow regulation in astronauts with orthostatic intolerance after flight // *Stroke.* 2011. V. 42. № 7. P. 1844–1850.
28. Катунцев В.П., Сухоставцева Т.В., Баранов М.В. и др. Влияние 14-суточной ортостатической гипокинезии на ортостатическую устойчивость организма человека // *Авиакосм. и экол. мед.* 2021. Т. 55. № 6. С. 42–49.
29. Katuntsev V.P., Sukhostavtseva T.V., Baranov M.V. et al. Effect of 14-day head up bedrest on orthostatic tolerance in humans // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2021. V. 55. № 6. P. 42–49.
30. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. М., 1975.
31. Anokhin P.K. Essays on the physiology of functional systems. Moscow, 1975.
32. Дизрегуляторная патология: Руководство для врачей и биологов / Г.Н. Крыжановский, ред. М., 2002.

Dysregulation pathology: A guide for physicians and biologists / G.N. Kryzhanovsky, ed. Moscow, 2002.

24. Shoemaker J.K., Hogeman C.S., Sinoway L.I. Contributions of MSNA and stroke volume to orthostatic intolerance following bed rest // Am. J. Physiol. 1999. V. 277 (Regulatory Integrative Com. Physiol. V. 46). P. R1084–R1090.

Поступила 27.04.2023

ON THE ASSESSMENT OF HUMAN BODY ORTHOSTATIC TOLERANCE

**Kotov A.N., Katuntsev V.P.,
Sukhostavtseva T.V., Baranov V.M.**

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Ratio of blood pressure (BP) and heart rate (HR) has been used as a quantitative indicator of the human orthostatic tolerance. The indicator was conventionally designated as an efficiency coefficient (EC) of the mechanisms involved in systemic BP control during the passive orthostatic test

(POT). The coefficient is measured in conventional units and calculated by formula $EC\ (conv.unit) = BP\ (mm\ Hg) / HR\ (beats/min)$.

Informativity of this indicator was verified by means of a retrospective analysis of 118 POTs performed by 30 essentially healthy male subjects (aged 19 to 40 yrs) before and after bed rest of varying duration. Prior to POT, EC in supine position made up 1.88 ± 0.04 conv. units. The EC decrease to $1.3 - 0.95$ conv. units during POT evidenced clearly the extent of changes in the cardiovascular functioning and POT endurance. After bed rest, all subjects demonstrated an increased cardiovascular strain and reduced POT endurance; however, EC values were reliably higher for the subjects who had shown a higher POT endurance before bed rest.

Based on analysis of individual reactions, the EC reduction to 1 conv.unit corresponded to the first pre-collapse signs and called for immediate POT termination. These results of the investigation make us believe that EC is an informative objective criterion for orthostatic tolerance evaluation that can be proposed for aerospace medicine applications.

Key words: orthostatic tolerance, bed rest, efficiency coefficient.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 118–125.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Рецензируемый научно-практический журнал «Авиакосмическая и экологическая медицина» принимает экспериментальные и теоретические работы отечественных и зарубежных авторов по актуальным проблемам авиационной, космической, морской, водолазной, спортивной и экологической физиологии и медицины. Основные рубрики журнала: «Обзоры», «Экспериментальные и общетеоретические исследования», «Клинические исследования», «Методики», «Краткие сообщения», «Дискуссии», «Письма в редакцию», «Рецензии», «Из истории космической биологии и авиакосмической медицины», «Хроника и информация», «Лекции». Издание осуществляется на безгонорарной основе.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, рекомендованных для опубликования материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Представление рукописей

Электронная версия статьи и сопроводительные документы присылаются по электронной почте на адрес: **e-mail: arhiv@imbp.ru**.

Статья должна сопровождаться сканом официального направления от учреждения, в котором она была подготовлена. На отдельном листе представляются: название статьи, сведения об авторах (Ф.И.О., организация, телефоны и e-mail для контактов), подписи всех авторов статьи. Скан этого документа направляется по электронной почте вместе с сопроводительным письмом и статьей. При наличии соавторов из зарубежных стран необходимо иметь подтверждение об их согласии на публикацию статьи.

Датой поступления считается дата получения редакцией рукописи. Статьи, отосланные авторам для исправления, должны быть возвращены в редакцию не позднее, чем через месяц в виде исправленной электронной версии с выделением внесенных изменений и приложением ответа авторов рецензенту текста. Статьи, не возвращенные в редакцию в течение одного месяца, снимаются с редакционного учета. Решение об одобрении или отклонении представленной в редакцию статьи принимается редакционной коллегией и является окончательным. Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать принятые работы.

Объем рукописей

Объем передовых, обзорных, проблемных, итоговых и дискуссионных статей не должен превышать 25 страниц, экспериментальных и общетеоретических исследований – 15 страниц (включая иллюстрации, таблицы, реферат и список литературы); объем рецензий, кратких сообщений и других материалов – не более 5 страниц.

Оформление рукописей

Статья должна включать титульные данные, реферат, ключевые слова, разделы: введение (без заголовка) с формулировкой цели исследования, **методику** (методы исследования и способы статистической обработки), **результаты и обсуждение, выводы**. В конце статьи приводится **список литературы**.

1. **Титульные данные:** индекс УДК, заглавие, фамилии авторов и инициалы, полное название учреждения, город, e-mail автора (с которым следует вести переписку). Если авторов несколько и они из разных учреждений, то у каждой фамилии и учреждения ставится соответствующий индекс. Далее необходимо указать **место работы авторов статьи на английском языке**.

Образец представления титульных данных:

УДК 612.085.4

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

Иванов И.С., Петров В.С., Сидоров Б.В.

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

Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: ivanov@mail.ru

УДК 591.392

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

Симонов С.Э.¹, Мамонтов Л.А.²

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Military Medical Academy named after S.M. Kirov, St. Petersburg

E-mail: simonov@mail.ru

2. Реферат. Реферат, объемом не более 250 слов, должен обеспечить понимание главных положений статьи. Рекомендуется составление реферата по следующей схеме: тема, характер и цель работы, объекты исследований, методики, основные теоретические и экспериментальные результаты. Реферат переводится на английский язык в редакции.

3. Ключевые слова: не более 7.

4. Текст. Статья должна быть напечатана на одной стороне листа А4 шрифтом Times New Roman, Arial или Tahoma 12 кегля через полтора интервала. Поля пронумерованных страниц должны быть: верхнее и нижнее – 2 см, левое – 3 см, правое – 1,5 см. Сохранять статью необходимо как документ Word 97-2003, с расширением *.doc.

5. Единицы измерения и сокращения. При выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

В тексте допускается сокращение часто встречающихся терминов и понятий по начальным буквам входящих в них слов, если при первом упоминании приведено полное название. После числовых значений единицы измерения сокращаются (1 нед, 1 сут, 1 ч, 1 мин, 1 с и т.п.).

6. Рисунки. Количество рисунков в статье не должно превышать 5. Рисунки, представленные на электронных носителях, должны быть в виде файлов программы, в которой они были созданы (Excel, Statistica и т.п.) или сохранены с расширением *.emf, *.wmf; либо в формате TIFF (расширение *.tiff) или JPEG (расширение *.jpeg), с разрешением не менее 300 dpi. Обозначения делаются нежирным шрифтом Arial или Tahoma на русском языке; на иностранном языке, если не предусмотрен вариант перевода. В комбинациях рисунков каждый из них обозначается прописными буквами (А, Б, В, Г) в левом нижнем углу.

В подрисуночных подписях приводятся: номер рисунка, его название и при необходимости – примечание, а также обозначения по осям абсцисс и ординат и единицы измерения (если они не нанесены на рисунок). В комбинации рисунков подрисуночная подпись должна включать общее название и далее после двоеточия определения рисунков под буквами (А, Б, В, Г). В подписях к микрофотографиям указывают метод окраски и увеличение.

При использовании иллюстраций других авторов (из журналов или сайтов) необходимо иметь разрешение на их публикацию.

7. Таблицы. Сверху справа необходимо указать номер таблицы. Ниже дается ее название. Дублирование данных в тексте, таблицах и на рисунках недопустимо. Если таблица или рисунок один, то номер не присваивается.

8. Формулы необходимо составлять с помощью конструктора формул программы Word или специально предназначенной для этого программы (MathType). Формулы нумеруются арабскими цифрами. Номер формулы заключается в круглые скобки и ставится у правого края. Желательно нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

9. Выводы, если их несколько, представляются по пунктам. Выводы статьи не должны оформляться в виде заключения и содержать ссылки на литературные источники.

10. Список литературы составляется путем сквозной нумерации цитируемых источников в соответствии с порядком упоминания их в тексте. Ссылки в тексте на цитируемую литературу даются в квадратных скобках. В оригинальных статьях цитируется не более 20 источников, в передовых статьях и обзорах литературы – не более 50. Самоцитирование допускается не более 15 %.

Библиографическое описание периодических изданий: фамилии и инициалы авторов, полное название статьи, стандартное сокращенное название журнала, год, том, номер, первая и последняя страницы. Для книг: название книги, место издания, издательство, год издания.

Допускается ссылка на интернет-ресурсы. В список литературы не могут быть включены рукописи, научные отчеты, патенты на изобретения.

Учитывая требования международных систем (таких как Web of Science и Scopus) в списке литературы под источником на русском языке помещается его библиографическая ссылка, имеющая следующую структуру: авторы (транслитерация), названия книги или статьи на английском языке, название источника на английском языке (**если периодическое издание – транслитерация**), выходные данные в цифровом формате.

Примеры исключений при транслитерации: Kazan, Kharkov, Nalchik, Perm, Ryazan, Tver, Yaroslavl etc (опускается символ мягкого знака); Moscow (не Moskva) Rostov-on-Don (не Rostov-na-Donu), St. Petersburg (не Sankt-Peterburg), Yekaterinburg (не Ekaterinburg).

Образец представления списка литературы:

1. Орквасов М.Ю., Иванов Г.Г., Ян-Борисова Е.Ю. и др. Методика и программа мониторингового контроля гидратации легких // Матер. 13-й науч.-практ. конф. «Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы». М., 2011. С. 195–201.

Orkvasov M.Yu., Ivanov G.G., Yan-Borisova E.Yu. et al. Methods and program to monitor lung hydration // Mat. of the 13th scientific and practical conference «Diagnosis and treatment of disorders of the cardiovascular system regulation». Moscow, 2011. P. 195–201.

2. Шумилина Г.А. Санитарно-гигиеническое обеспечение космонавтов на Международной космической станции // Международная космическая станция. Российский сегмент. Космическая биология и медицина: В 2 т. Т. 1. Медицинское обеспечение экипажей МКС. Москва, 2011. С. 333–341.

Shumilina G.A. Sanitary and hygienic provision of cosmonauts at the International space station // International space station. Russian segment. Space biology and medicine: In 2 v. V. 1. Medical support of the ISS crews. Moscow, 2011. P. 333–341.

3. Афонин Б.В., Носков В.Б., Поляков В.В. Состояние пищеварительной системы в условиях длительного космического полета // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 5. С. 53–59.

Afonin B.V., Noskov V.B., Polyakov V.V. The state of the digestive organs during long-term spaceflight // Fiziologiya cheloveka. 2003. V. 29. № 5. P. 53.

4. Шерлок Ш., Дули Дж. Заболевания печени и желчных путей: Пер. с англ. М., 1999.

Sherlock Sh., Dooley G. Diseases of the liver and biliary system. Moscow, 1999.

5. Виноходова А.Г., Быстрицкая А.Ф., Смирнова Т.М. Способность к психической саморегуляции как фактор устойчивости к стрессу в экстремальных условиях космического полета // Авиакосм. и экол. мед. 2005. Т. 39. № 5. С. 14–18.

Vinokhodova A.G., Bystritskaya A.F., Smirnova T.M. Ability to control own psyche as a factor of stress tolerance in the extreme conditions of space flight // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2005. V. 39. № 5. P. 14–18.

Работы на кириллице можно автоматически транслитерировать на сайте translit.ru, выбирая стандарт BSI (British Standards Institution). Переводчик Google позволяет перевести описание источника.

Образец представления списка иностранной литературы:

1. Berger M., Gerstenbrand F., Burlatchkova N.S. et al. Eye-head-arm coordination and spinal reflexes in weightlessness // Health from Space Res. Ed. ASM. Wien, 1992. P. 19–135.

2. Gallash E., Kozlovskaya I.B. Vibrographic signs of autonomous muscle tone studied in longterm space mission // Acta Astronaut. 1998. V. 43. № 3–6. P. 101–106.

3. Gitelson J.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D. Manmade closed ecological systems. Taylor & Francis Group. London; N.Y., 2003.

Образец представления ссылки на интернет-ресурсы:

1. Анисимов В.Н. Мелатонин: роль в организме, применение в клинике. [Электронный ресурс]. СПб., 2007. URL: <http://bono-esse.ru/blizzard/Farma/Melatonin/melatonin.html>.

Anisimov V.N. Melatonin: a role in an organism, use in clinic. [Electronic resource]. St. Petersburg, 2007. URL: <http://bono-esse.ru/blizzard/Farma/Melatonin/melatonin.html>.

2. Сазонов В.Ф. Гипоталамус. [Электронный ресурс]. URL: kineziolog.bodhy.ru [сайт]. URL: <http://kineziolog.bodhy.ru/content/gipotalamus>.

Sazonov V.F. Hypothalamus [Electronic resource]. URL: kineziolog.bodhy.ru [website]. URL: <http://kineziolog.bodhy.ru/content/gipotalamus>.

Биоэтика

В статьях, описывающих результаты исследований на человеке и на животных должны быть ссылки на одобрительное решение локальных (институтских) комиссий (комитетов) по биомедицинской этике с указанием даты и номера протокола. При проведении исследований с участием людей от каждого из них должно быть получено добровольное Информированное согласие, подписанное после разъяснения потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Редакционная этика

Представление в редакцию работ, которые уже опубликованы в других изданиях или посланы для публикации в другие издательства, не допускается. Статьи, принятые редакцией, не могут быть опубликованы в других изданиях без письменного разрешения издателя журнала «Авиакосмическая и экологическая медицина». Редакция не несет ответственность за достоверность данных, представленных в статье.

Справки

Справки по всем вопросам, связанным с публикацией статей, можно получить у ответственного секретаря, заведующей делопроизводством журнала и в общем отделе редакции.

Контактная информация:

Заведующая делопроизводством журнала: тел., факс: **8(499)195-65-12**, Муромцева Татьяна Салеховна, e-mail: **arhiv@imbp.ru**.

Общий отдел редакции: тел. 8(499)195-68-74, e-mail: library@imbp.ru.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами сотрудников ГНЦ РФ – ИМБП РАН:

Бондаренко Валентину Александровну

Кожину Елену Яковлевну

Корнилову Людмилу Николаевну

Мойсу Светлану Степановну

Романенко Татьяну Владимировну

Сидоренко Лидию Афанасьевну

Соколова Вячеслава Владимировича

Соколова Геннадия Михайловича

Фомину Елену Валентиновну

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!