

АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Орлов О.И., д.м.н., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

2018 Т. 52 № 5

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1967 ГОДУ

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

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

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

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

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

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

**Метаданные статей, опубликованных в журнале, 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 25.09.2018
Подписано в печать 09.10.2018
Формат 60 × 84 1/8
Гарнитура Tahoma
Печать офсетная
Усл. печ. л. 8,84
Тираж 200 экз
Заказ № 239

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

Содержание

Contents

Обзоры

Reviews

Мирзоев Т.М., Шенкман Б.С. Биогенез рибосом и гипогравитационная атрофия скелетных мышц млекопитающих

5

Mirzoev T.M., Shenkman B.S. Ribosome biogenesis and hypogravity-induced atrophy of mammalian skeletal muscles

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Котовская А.Р., Колотева М.И., Глебова Т.М. Переносимость перегрузок российским космонавтом и американским астронавтом на участке спуска космического корабля «Союз» с орбиты на Землю в 340-суточном космическом полете на Международной космической станции

13

Kotovskaya A.R., Koloteva M.I., Glebova T.M. Tolerance of G-loads by the Russian cosmonaut and NASA astronaut during the «Soyuz» space vehicle de-orbit after the 340-day mission to the International space station

Богомолов В.В., Поляков А.В., Попова И.И., Ковачевич И.В., Алферова И.В., Репенкова Л.Г. Диагностика и лечение заболеваний стоматологического профиля в пилотируемых космических полетах на орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции

19

Bogomolov V.V., Poliakov A.V., Popova I.I., Kovachevich I.V., Alferova I.V., Repenkova L.G. Diagnostics and treatment of dental profile diseases in the missions to orbital station «Mir» and the International space station

Гущин В.И., Кувшинова О.Л., Шалина О.С., Виноходова А.Г., Зюдфелд П. (Suedfeld P.), Джонсон Ф.Дж. (Johnson Ph.J.) Методический подход к исследованию автобиографических представлений космонавтов

23

Gushchin V.I., Kuvshinova O.L., Shalina O.S., Vinokhodova A.G., Suedfeld P., Johnson Ph.J. Methodical approach to the studies of cosmonauts' presentation of autobiographies

Кукоба Т.Б., Новиков В.Е., Бабич Д.Р., Лысова Н.Ю., Гордиенко К.В., Фомина Е.В. Профилактическая эффективность резистивных упражнений для костной системы космонавтов в многократных длительных космических полетах

28

Kukoba T.B., Novikov V.E., Babich D.R., Lysova N.Yu., Gordienko K.V., Fomina E.V. Preventive effectiveness of resistive exercises for the bone system of cosmonauts in repeated long-duration space missions

Усанова Н.А., Морозова Ю.А., Носовский А.М., Ильин В.К. Опыт использования аутопробиотиков на основе энтерококков и лактобацилл в экспериментах с длительной изоляцией и в условиях «сухой» иммерсии

34

Usanova N.A., Morozova Yu.A., Nosovsky A.M., Ilyin V.K. Experience of using enterococci- and lactobacilli-based auto probiotics in experiments with long-term isolation and «dry» immersion

Усков К.В., Фомина Е.В. Сравнительный анализ эффективности средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности на физическую работоспособность человека в эксперименте с 520-суточной изоляцией

39

Uskov K.V., Fomina E.V. Comparative analysis of the effectiveness of countermeasures to the negative effects of low motor activity on human physical working capacity in the experiment with 520-day isolation

- Чунтул А.В., Козловский А.П. Светоимпульсная стимуляция в системе коррекции состояния авиационных специалистов **47** Chuntul A.V., Kozlovsky A.P. Pulsing light stimulation in state correction of aviation personnel
- Семенов Д.Г., Беляков А.В. Воздействие острой гипобарии на поведение и долговременную память крыс **53** Semenov D.G., Belyakov A.V. Effect of acute hypobaria on rat's behavior and long-time memory
- Смирнов И.А., Ильин В.К., Тюрин-Кузьмин А.Ю., Солдатов П.Э., Шулагин Ю.А., Смоленская Т.С., Коршунов Д.В., Камнева А.И. Микробный топливный элемент в орбитальном полете космического аппарата «Фотон-М4» **58** Smirnov I.A., Ilyin V.K., Tyurin-Kuzmin A.Yu., Soldatov P.E., Shulaguin Yu.A., Smolenskaya T.S., Korshunov D.V., Kamneva A.I. Microbial fuel cell in the orbital flight of spacecraft «Foton-M4»
- Озеров Д.С., Мухамедиева Л.Н., Баринов В.А., Сидорин Г.И. Экспериментальное обоснование методологии ускоренного гигиенического нормирования химических веществ, загрязняющих воздушную среду пилотируемых орбитальных станций **62** Ozerov D.S., Mukhamedieva L.N., Barinov V.A., Sidorin G.I. Experimental substantiation of the methodology for expedited setting of hygienic standards for chemical substances polluting air of piloted orbital stations
- Климарев С.И. Оптимизация конструкции СВЧ-устройства для обеззараживания и нагрева водных сред системы жизнеобеспечения **70** Klimarev S.I. Optimization of the UHF-device designed for life support system water decontamination and heating

ОБЗОРЫ

УДК 612.74

БИОГЕНЕЗ РИБОСОМ И ГИПОГРАВИТАЦИОННАЯ АТРОФИЯ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Мирзоев Т.М., Шенкман Б.С.

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

E-mail: tmirzoev@yandex.ru

Пониженная сократительная активность скелетной мышцы в течение длительного времени, наблюдаемая при постельной гипокинезии, иммобилизации конечностей, а также в условиях реальной или моделируемой микрогравитации, приводит к атрофическим изменениям, в основе которых лежит снижение интенсивности синтеза мышечного белка. Интенсивность белкового синтеза в скелетной мышце определяется как эффективностью трансляции (translational efficiency), так и трансляционной емкостью (translational capacity). Под эффективностью трансляции понимают скорость синтеза белка на данной рибосоме, тогда как трансляционная емкость определяется в первую очередь количеством рибосом на единицу ткани и соответственно зависит от биогенеза рибосом. Однако роль биогенеза рибосом в регуляции белкового синтеза в скелетной мышце млекопитающих в условиях функциональной разгрузки остается малоизученной. Цель данного обзора состоит в раскрытии молекулярных механизмов, определяющих трансляционную емкость, а также анализ данных литературы о влиянии функциональной разгрузки на основные маркеры рибосомального биогенеза в скелетной мышце.

Ключевые слова: функциональная разгрузка, камбаловидная мышца, синтез белка, биогенез рибосом.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 5–12.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-5-12

Хорошо известно, что пониженная сократительная активность скелетной мышцы в течение длительного времени (пребывание в невесомости, постельная гипокинезия, гипсовая иммобилизация, денервация) приводит к снижению интенсивности синтеза белка и соответственно уменьшению массы и размеров мышечных волокон (атрофия) [1–9]. По современным представлениям интенсивность белкового синтеза в скелетной мышце определяется как эффективностью трансляции (translational efficiency), так и трансляционной емкостью (translational capacity) [10]. Под эффективностью трансляции понимают скорость синтеза белка на данной рибосоме, тогда как трансляционная

емкость определяется в первую очередь количеством рибосом на единицу ткани и соответственно зависит от биогенеза рибосом [10]. Однако роль биогенеза рибосом в регуляции белкового синтеза в скелетной мышце млекопитающих в условиях функциональной разгрузки остается малоизученной. В связи с этим цель данного обзора состоит в раскрытии молекулярных механизмов, определяющих трансляционную емкость, а также анализе данных литературы о влиянии функциональной разгрузки на синтез белка и основные маркеры рибосомального биогенеза в скелетных мышцах грызунов и человека.

Регуляция биогенеза рибосом

Увеличение трансляционной емкости через активацию рибосомального биогенеза позволяет клетке продуцировать множество белков из одной мРНК с помощью полисом, что является необходимым фактором для клеточного роста. Учитывая тот факт, что 60 % всей транскрипции приходится на синтез рибосомальной РНК (рРНК) ферментом РНК-полимеразой 1 и 50 % транскрипционных событий, осуществляемых РНК-полимеразой 2, включают продукцию рибосомных белков во время периода роста, можно сказать, что биогенез рибосом – ключевой процесс для увеличения синтеза белка и роста клетки [11, 12]. Рибосомальный биогенез представляет собой высокоорганизованный процесс, включающий работу 3 видов РНК-полимераз (РНК-полимеразы 1, 2 и 3). РНК-полимераза 1 ответственна за транскрипцию полицистронной 47S пре-рРНК в ядрышках, которая после сплайсинга формирует 18S, 5.8S и 28S рРНК. Считается, что зависимость от РНК-полимеразы 1 транскрипция является стадией, лимитирующей скорость биогенеза рибосом [13]. РНК-полимераза 2 необходима для транскрипции генов, кодирующих рибосомные белки, а РНК-полимераза 3 принимает участие в транскрипции 5S рРНК и тРНК. В современной литературе описаны 2 ключевых регулятора рибосомального

биогенеза в клетке: протеинкиназа mTORC1 (мишень для рапамицина млекопитающих, комплекс 1) и транскрипционный фактор с-мус (протоонкоген миелоцитоматоза). Важно отметить, что mTORC1 также является ключевым регулятором инициации трансляции, таким образом, принимая участие в регуляции эффективности трансляции. Для ознакомления с mTORC1-зависимыми и mTORC1-независимыми сигнальными путями, регулирующими эффективность трансляции, читатель может обратиться к ряду обзорных статей [14–16].

mTORC1 и с-мус напрямую способствуют активации транскрипции 47S пре-рРНК посредством активации 2 факторов транскрипции рибосомальной ДНК (рДНК): селективного фактора 1 (SL-1) и ядрышкового транскрипционного фактора UBF (Upstream Binding Factor), – которые связываются с регуляторным элементом промотора и стабилизируют иницирующий комплекс [17, 18]. Транскрипционный фактор с-мус также способствует ацетилированию гистонов H3 и H4 в промоторных областях, что ведет к деконденсации хроматина и облегчению транскрипции генов рРНК [19, 20]. Кроме того, есть данные, что с-мус принимает участие в активации генов, кодирующих рибосомальные белки большой и малой субъединицы рибосомы, а также увеличивает транскрипционную активность РНК-полимеразы 3 через транскрипционный фактор IIIB (TFIIIB) [10]. В свою очередь, экспрессия с-мус может зависеть от сигнального пути Wnt/GSK-3 β / β -катенин. Связывание белка Wnt со специфическими мембранными рецепторами приводит к фосфорилированию и активированию белка Dvl (disheveled) [10]. Далее Dvl фосфорилирует и ингибирует киназу гликогенсинтазы 3 β (GSK-3 β), что приводит к неспособности GSK-3 β фосфорилировать и ингибировать β -катенин. Накопление дефосфорилированных форм β -катенина ведет к транслокации данного белка в ядро, где β -катенин участвует в активации экспрессии фактора с-мус [21, 22]. Фосфорилирование/ингибирование GSK-3 β может быть также достигнуто активацией АКТ (протеинкиназа В) или поддержанием высокого уровня оксида азота. Соответственно эти механизмы могут участвовать в поддержании высокой интенсивности экспрессии с-мус и соответственно биогенеза рибосом. Эти спекулятивные соображения, пока не подкрепленные экспериментальными данными, позволяют связать регуляцию биогенеза рибосом с каноническими анаболическими сигнальными путями мышцы и физиологически значимыми «входными» сигналами.

mTORC1 также может регулировать зависимую от РНК-полимеразы 3 транскрипцию посредством взаимодействия с транскрипционным фактором IIIC (TFIIIC) и белком Maf-1 [10]. На культуре клеток млекопитающих было показано, что mTOR может находиться в ядре и напрямую связываться с

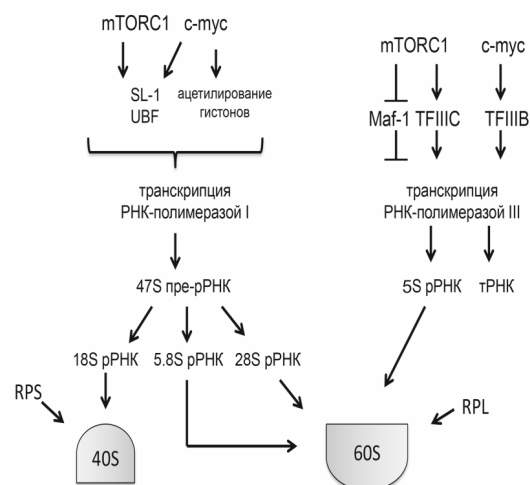


Рисунок. Основные факторы регуляции биогенеза рибосом (адаптировано из работы [10]).

с-мус – протоонкоген миелоцитоматоза; Maf-1 – фактор репрессии транскрипции; mTORC1 – мишень рапамицина у млекопитающих – комплекс 1; RPS – рибосомальные белки малой субъединицы рибосомы (40S); RPL – рибосомальные белки большой субъединицы рибосомы (60S); SL-1 – селективный фактор транскрипции, осуществляемой РНК-полимеразой 1; TFIIIB, TFIIIC – транскрипционные факторы IIIB и IIIC; UBF – ядрышковый транскрипционный фактор, регулирующий транскрипцию генов рРНК РНК-полимеразой 1

промоторами рДНК и участвовать в ремоделировании хроматина, приводя к активации транскрипции рибосомальных генов [23, 24]. Кроме того, в активации транскрипции генов рДНК важная роль принадлежит ростозависимому фактору инициации транскрипции (TIF-1A), который может взаимодействовать с РНК-полимеразой 1, способствуя ее активации [25]. Было показано, что ингибирование mTORC1 рапамицином приводит к инактивации TIF-1A и снижает транскрипцию 47S пре-рРНК [18]. Пока неясно, какие механизмы обуславливают импорт mTORC1 в ядра и его локализацию в нуклеоплазме. Также неизвестны и механизмы, контролируемые связывание mTORC1 с промотором рДНК. Тем не менее не исключено, что mTORC1 является звеном, связывающим биогенез рибосом с каноническими сигнальными путями анаболической направленности. Здесь следует отметить, что в различных экспериментальных ситуациях наблюдались реципрокные отношения сигнального пути mTORC1/p70S6k и экспрессии рибосомальной РНК. Когда высок уровень фосфорилирования p70S6k, содержание 18S и 28S рРНК снижается, и наоборот [26, 27]. По-видимому, это не только обеспечивает необходимый баланс 2 компонентов анаболического процесса, но и является косвенным свидетельством существования сложных регуляторных механизмов,

определяющих как биогенез рибосом, так и трансляционную эффективность.

В целом в литературе, посвященной биохимии и молекулярной биологии скелетных мышц млекопитающих, основными маркерами биогенеза рибосом принято считать 47S пре-rРНК, 18S и 28S rРНК, транскрипционные факторы с-мус, UBF, TIF-IA, mTORC1 [26, 28–33], а также содержание тотальной (общей) РНК, так как rРНК составляет примерно 85 % от всей РНК в клетке [34]. Основные факторы регуляции биогенеза рибосом изображены на рисунке.

Ниже будут рассмотрены изменения интенсивности синтеза белка в скелетной мышце человека и животных, а также приведены имеющиеся данные о состоянии маркеров рибосомального биогенеза в скелетной мышце млекопитающих на фоне функциональной разгрузки.

Влияние функциональной разгрузки на синтез белка в скелетных мышцах человека и животных

Хорошо известно, что длительное пребывание человека в условиях невесомости или гипокинезии приводит к снижению синтеза белка как на уровне целого организма, так и в скелетных мышцах [35, 36]. Большинство исследований, посвященных интенсивности синтеза белка в атрофированной в результате пониженной активности мышце человека, проводились на таких моделях, как постельная гипокинезия и иммобилизация конечности. В ряде исследований применяется модель одностороннего вывешивания нижней конечности (ULLS – unilateral lower limb suspension), при котором согнутую в колене ногу подвешивают на резиновом тяже к поясу человека при его опоре на костыли. При этом анализу подвергалась, главным образом, четырехглавая мышца бедра (*m. quadriceps femoris*), в частности, одна из ее головок – широкая латеральная мышца бедра (*m. vastus lateralis*). Как правило, интенсивность синтеза белка в этих исследованиях оценивается в гомогенате биоптата или в его различных фракциях с помощью масс-спектрометрической детекции включения нерадио меченных аминокислот [37]. Одно из самых ранних исследований скорости синтеза белка в атрофированной скелетной мышце человека принадлежит Gibson et al. (1987), которые показали, что гипсовая иммобилизация нижней конечности в течение месяца приводит к достоверному снижению синтеза белка в *m. quadriceps femoris* на 26 % [38]. С использованием такой же модели (гипсовая иммобилизация в течение 14 сут) на 12 мужчинах-добровольцах было показано, что синтез миофибриллярного белка в четырехглавой мышце бедра иммобилизованной конечности достоверно снижался на 31 % относительно контрольных значений [39]. Ferrando et al. (1996) показали,

что 14-суточная постельная гипокинезия приводит к почти 50%-ному снижению синтеза белка в скелетных мышцах человека, при этом общий (*whole-body*) синтез белка снизился на 14 % [40]. В работе Paddon-Jones et al. (2006) у 6 добровольцев после 28-суточной постельной гипокинезии (*bedrest*) было обнаружено достоверное снижение синтеза белка в *m. vastus lateralis* [41]. Иммобилизация нижней конечности в коленном суставе в течение 2 нед вызвала достоверное снижение синтеза белка на 27 % в четырехглавой мышце бедра [42]. На модели ULLS (длительностью 10 и 21 сут) было обнаружено достоверное снижение интенсивности синтеза миофибриллярного белка в *m. quadriceps femoris* 9 здоровых добровольцев [43]. Недавно опубликованная работа Wall et al. (2016) показала, что значительное снижение синтеза миофибриллярного белка (-41% , $p < 0,05$) в *m. quadriceps femoris* может происходить уже через 5 сут гипсовой иммобилизации нижней конечности [44].

В отличие от исследований на человеке, на животных моделях были получены более полные данные об интенсивности белкового синтеза в скелетных мышцах разного типа (медленные, быстрые) на различных сроках функциональной разгрузки. Одно из первых исследований синтеза белка в скелетных мышцах крысы в условиях иммобилизации задней конечности было проведено Goldspink (1977) на молодых растущих крысах (масса 50–60 г) [45]. Анализировались камбаловидная мышца (*m. soleus*) (медленная тоническая мышца) и длинный разгибатель пальцев (*m. extensor digitorum longus* – EDL) (быстрая фазная мышца). При 7-суточной иммобилизации сустава в разогнутой позиции *m. soleus* находилась в укороченном положении, тогда как EDL – в растянутом. Такая иммобилизация привела к значительной атрофии *m. soleus*, при этом синтез белка достоверно снизился уже через 6 ч иммобилизации. Наибольшее снижение белкового синтеза в *m. soleus* наблюдалось через 48 ч разгрузки [45]. Подавленный синтез белка наблюдался и после 3 и 7 сут иммобилизации [45]. В то же время в EDL произошло резкое увеличение синтеза белка после 12 ч иммобилизации, которое держалось в течение всего эксперимента (7 сут) [19]. Примечательно, что при иммобилизации сустава в согнутой позиции изменения в обеих мышцах были противоположными [45]. Loughna et al. (1986), используя антиорто-статическое вывешивание, впервые показали достоверное снижение интенсивности синтеза белка в *m. soleus* молодых крыс (массой 100 г) на 21 % после 3-суточного вывешивания [2]. Этой же группой исследователей было установлено достоверное снижение синтеза белка на 5-е сутки вывешивания как в *m. soleus*, так и в *m. gastrocnemius medialis* и EDL [46]. В работе Munoz et al. (1993) было установлено, что в *m. soleus* молодых самок крыс в первые

дни антиортостатического вывешивания (24–72 ч) наблюдается достоверное снижение синтеза миофибриллярных белков [47]. Методом измерения скорости синтеза белка *in vitro* (с помощью радиомеченного фенилаланина) Fluckey et al. (2004) обнаружили достоверное снижение синтеза белка в *m. soleus* взрослых 7-месячных крыс после 4-суточного антиортостатического вывешивания [48]. Группой французских исследователей было показано достоверное снижение интенсивности синтеза белка в камбаловидной и передней большеберцовой (*m. tibialis anterior*) мышцах крысы при более длительных сроках вывешивания (21 сут) [49, 50]. В *m. soleus* 6-месячных крыс после 28-суточного вывешивания было также показано достоверное снижение синтеза белка *in vitro* [51].

Начиная с 2011 г. исследователями стал широко использоваться нерадиоактивный метод измерения синтеза белка *in vivo* SUnSET (Surface sensing of translation) [52]. В последние годы с помощью данного метода, основанного на измерении конъюгированного с полипептидной цепью пуromицина, были получены новые данные о динамике синтеза белка в скелетных мышцах грызунов в условиях функциональной разгрузки. You et al. (2015) на мышцах с иммобилизованной задней конечностью было показано, что механическая разгрузка в течение 3 и 7 сут приводит к достоверному снижению синтеза белка в *m. soleus*, *m. gastrocnemius* и *m. plantaris*, при этом наиболее глубокие изменения наблюдались в *m. soleus* [53]. В нашей лаборатории на камбаловидной мышце крысы в условиях гравитационной разгрузки было показано статистически достоверное снижение интенсивности синтеза белка *in vivo* как после 3- и 7-суточной разгрузки [54], так и после 2-недельного антиортостатического вывешивания [55]. Baehr et al. (2017) на взрослых 9-месячных крысах показали динамику синтеза белка в 3 мышцах голени (*m. soleus*, *m. gastrocnemius medialis*, *m. tibialis anterior*) в ответ на функциональную разгрузку методом вывешивания [56]. После 3-суточной разгрузки снижение синтеза белка имело место во всех 3 мышцах, однако наибольшее снижение наблюдалось в *m. soleus* и *m. gastrocnemius medialis* [56]. В камбаловидной мышце пониженный синтез белка держался и на более длительных сроках вывешивания (7 и 14 сут), тогда как в *m. gastrocnemius medialis* синтез белка был снижен после 7 сут, однако на 14-е сутки произошло его восстановление до контрольного уровня [56].

Таким образом, на различных моделях функциональной разгрузки нижней конечности человека было показано, что пониженная сократительная активность скелетной мышцы выражается в достоверном снижении интенсивности синтеза белка как на ранних стадиях разгрузки (5 сут), так и на более поздних этапах (14 и 28 сут). В экспериментах

с грызунами было показано, что степень снижения синтеза белка зависит как от используемой модели механической разгрузки и длительности воздействия, так и от функциональных и метаболических особенностей конкретной скелетной мышцы. Наиболее глубокое и более раннее снижение интенсивности синтеза белка наблюдалось в постуральной *m. soleus*. Причем сниженный уровень синтеза белка в этой мышце держится довольно долгое время. Интересно и то, что это снижение в ряде случаев значительно прогрессирует по мере увеличения продолжительности воздействия.

Снижение синтеза белка постуральной мышцы наблюдается уже в 1-е сутки функциональной разгрузки, которое и продолжается как минимум до месяца.

В основе снижения уровня белкового синтеза в условиях функциональной разгрузки могут лежать изменения в рибосомальном биогенезе, определяющем трансляционную емкость.

Изменения маркеров биогенеза рибосом при функциональной разгрузке скелетных мышц млекопитающих

В настоящее время роль биогенеза рибосом в регуляции синтеза белка в скелетной мышце, атрофированной в результате бездействия, изучена недостаточно. В существующей литературе представлены лишь отрывочные сведения о состоянии маркеров трансляционной емкости (биогенеза рибосом) в скелетной мышце млекопитающих в условиях функциональной разгрузки. Наиболее исследованным маркером рибосомального биогенеза является концентрация общей РНК, нормированная на мг мышечной ткани. Кроме того, существует несколько работ, в которых оценивалось содержание 28S + 18S рРНК в мышечной ткани.

Накопленные к настоящему времени данные литературы о состоянии маркеров биогенеза рибосом в скелетных мышцах грызунов в условиях функциональной разгрузки обобщены в таблице. Из таблицы видно, что при иммобилизации и антиортостатическом вывешивании снижение общего содержания РНК и рибосомальной РНК при всех изученных продолжительностях воздействия наблюдается преимущественно в камбаловидной мышце. В мышцах с преобладанием волокон быстрого типа, как правило, такие феномены не наблюдаются. Интересно, что снижение содержания РНК и экспрессии рибосомальной РНК при разгрузке начинается уже после 24 ч воздействия (иммобилизации или вывешивания) и продолжается в течение длительного времени (до 14 сут). Обращает на себя внимание и то, что, судя по результатам единственного исследования, анализирующего состояние ключевых регуляторов экспрессии рибосомальной РНК и белков *c-myc* и *ITS-1*, уровень их экспрессии к 14-м суткам

Таблица

**Влияние функциональной разгрузки на маркеры рибосомального биогенеза
в скелетных мышцах лабораторных животных**

Животное	Мышца	Способ функциональной разгрузки	Длительность разгрузки	Изменение маркера биогенеза рибосом	Ссылка
Крыса	m. soleus	Иммобилизация	1, 5 и 7 сут	Концентрация общей РНК ↓	[45, 46]
Крыса	GM	Иммобилизация	5 сут	Концентрация общей РНК ↓	[46]
Мышь	EDL	Иммобилизация	3 сут	Общая РНК — 18S + 28S рРНК —	[53]
Крыса	m. soleus	HS	3 и 7 сут	Общая РНК ↓	[2]
Крыса	m. soleus	HS	7 сут	Общая РНК ↓ 18S рРНК ↓	[57]
Крыса	m. soleus	HS	6 сут	Общая РНК ↓ 18S+28S рРНК ↓	[58]
Крыса	m. soleus	HS	7 сут	Общая РНК ↓	[59]
Крыса	m. soleus	HS	14 сут	Общая РНК ↓	[60]
	TA			Общая РНК —	
Крыса	m. soleus	HS	14 сут	c-мус — ITS-1 —	[60]
Крыса	m. soleus	HS	1, 3, 7 сут	Общая РНК ↓ 28S рРНК ↓	[54]

Примечание. ↓ — снижение; — — отсутствие изменений.

GM — m. gastrocnemius medialis; EDL — m. extensor digitorum longus; TA — m. tibialis anterior; HS — антиортостатическое вывешивание грызунов.

вывешивания в камбаловидной мышце крыс не изменился [60]. Вполне возможно, что изменения экспрессии этих регуляторов приходятся на более ранние стадии процесса. Не исключено и то, что причиной снижения экспрессии рРНК при гравитационной разгрузке является изменение других регуляторов этого комплексного процесса (например, mTOR). Несомненно, что имеющиеся отрывочные сведения о регуляции биогенеза рибосом в условиях разгрузки пока не позволяют сделать сколько-нибудь серьезных заключений о природе снижения интенсивности этого процесса при инактивации камбаловидной мышцы.

Из доступной нам литературы известно лишь несколько работ, в которых бы анализировались маркеры трансляционной емкости в скелетной мышце человека после периода функциональной разгрузки. В одной из работ была отмечена пониженная общая концентрация рибосом в скелетной мышце человека в течение 3, 10, 20 и 30 сут послеоперационного периода, связанного с пониженной функциональной активностью [61]. Gamrin et al. (1998) после периода 10-суточной функциональной разгрузки нижней конечности обнаружили в скелетной мышце человека достоверное снижение концентрации общей РНК на 16 % [62]. Одностороннее вывешивание нижней конечности (ULLS) 11 добровольцев в течение 5 нед привело к достоверному снижению концентрации общей РНК на 13 % в m. vastus lateralis [63].

Очевидно, что, опираясь на сегодняшний уровень наших знаний об изменениях биогенеза рибосом в условиях разгрузки, пока рано судить о вкладе этого процесса в общую картину снижения интенсивности синтеза белка в мышце. Однако сравнительный анализ изменений сигнальных путей, регулирующих интенсивность трансляции, и характеристик биогенеза рибосом на ранних этапах разгрузки позволяет высказать некоторые осторожные предположения. Так, исследование динамики основных регуляторов трансляции сигнальных путей mTORC1/p70S6K и GSK3β/eIF2 при гравитационной разгрузке показывает, что в 1-е сутки воздействия снижение активности этих путей не наблюдается [54]. Естественно предположить, что раннее снижение синтеза белка в этот период определяется снижением интенсивности биогенеза рибосом [54].

Понятно, что для формирования общей картины анаболических процессов на инициальном этапе функциональной разгрузки в m. soleus, необходимы дальнейшие исследования.

Выводы

1. Снижение синтеза белка в условиях функциональной разгрузки может наблюдаться во всех скелетных мышцах, однако величина и длительность такого снижения зависят от конкретной мышцы. Результаты, полученные лишь на одной мышце, должны с осторожностью распространяться

на другие скелетные мышцы, которые могут отличаться по своим функциям и структуре (соотношение медленных и быстрых волокон). Например, изменения, касающиеся синтеза и распада белка, в *m. soleus* крысы и *m. quadriceps femoris* человека могут существенно отличаться.

2. Для более полного понимания молекулярных механизмов развития атрофии от бездействия важно проводить исследования в динамике, т.е. производить забор биоматериала на разных стадиях функциональной разгрузки. Эти замечания в полной мере относятся и к феномену снижения биогенеза рибосом. Как показывают результаты исследований, рассмотренные в данном обзоре, выраженность этого процесса при гравитационной разгрузке зависит от исследуемой мышцы, характера инактивационной модели и продолжительности воздействия.

3. Несмотря на то что в последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в понимании молекулярно-клеточных механизмов развития мышечной атрофии, в настоящее время требуются дальнейшие исследования, направленные как на установление триггерных («пусковых») механизмов развития атрофии, так и на поиск новых сигнальных путей, приводящих к потере мышечной массы вследствие функциональной разгрузки.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 17-75-20152.

Список литературы

1. Oganov V.S., Potapov A.N. On the mechanisms of changes in skeletal muscles in the weightless environment // *Life Sci. Space Res.* 1976. V. 14. P. 137–143.
2. Loughna P., Goldspink G., Goldspink D.F. Effect of inactivity and passive stretch on protein turnover in phasic and postural rat muscles // *J. Appl. Physiol.* 1986. V. 61. P. 173–179.
3. Thomason D.B., Booth F.W. Atrophy of the soleus muscle by hindlimb unweighting // *Ibid.* 1990. V. 68. P. 1–12.
4. Vandenburg H., Chromiak J., Shansky J. et al. Space travel directly induces skeletal muscle atrophy // *FASEB J.* 1999. V. 13. P. 1031–1038.
5. Fitts R.H., Riley D.R., Widrick J.J. Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle // *J. Appl. Physiol.* 2000. V. 89. P. 823–839.
6. Phillips S., McGlory C. CrossTalk proposal: The dominant mechanism causing disuse muscle atrophy is decreased protein synthesis // *J. Physiol.* 2014. V. 592. P. 5341–5343.
7. Phillips S., McGlory C. Rebuttal from Stuart M. Phillips and Chris McGlory // *Ibid.* P. 5349.
8. Reid M., Judge R., Bodine S. CrossTalk opposing view: The dominant mechanism causing disuse muscle atrophy is proteolysis // *Ibid.* P. 5345–5347.

9. Reid M., Judge A., Bodine S. Rebuttal from Michael B. Reid, Andrew R. Judge and Sue C. Bodine // *Ibid.* P. 5351.
10. Chaillou T., Kirby T.J., McCarthy J.J. Ribosome biogenesis: emerging evidence for a central role in the regulation of skeletal muscle mass // *J. Cell. Physiol.* 2014. V. 229. P. 1584–1594.
11. Warner J.R. The economics of ribosome biosynthesis in yeast // *Trends Biochem. Sci.* 1999. V. 24. P. 437–440.
12. Granneman S., Tollervey D. Building ribosomes: even more expensive than expected? // *Cur. Biol.* 2007. V. 17. P. 415–417.
13. Moss T., Stefanovsky V.Yu. Promotion and regulation of ribosomal transcription in eukaryotes by RNA polymerase I // *Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol.* 1995. V. 50. P. 25–66.
14. Matsakas A., Patel K. Intracellular signalling pathways regulating the adaptation of skeletal muscle to exercise and nutritional changes // *Histol. Histopathol.* 2009. V. 24. P. 209–222.
15. Mahoney S.J., Dempsey J.M., Blenis J. Cell signaling in protein synthesis ribosome biogenesis and translation initiation and elongation // *Prog. Mol. Biol. Transl. Sci.* 2009. V. 90. P. 53–107.
16. Bodine S.C. Disuse-induced muscle wasting // *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 2013. V. 45. P. 2200–2208.
17. Hannan K.M., Brandenburger Yu., Jenkins A. et al. mTOR-dependent regulation of ribosomal gene transcription requires S6K1 and is mediated by phosphorylation of the carboxy-terminal activation domain of the nucleolar transcription factor UBF // *Mol. Cell. Biol.* 2003. V. 23. P. 8862–8877.
18. Mayer C., Zhao J., Yuan X., Grummt I. mTOR-dependent activation of the transcription factor TIF-IA links rRNA synthesis to nutrient availability // *Genes Dev.* 2004. V. 18. P. 423–434.
19. Arabi A., Wu S., Ridderstrale K. et al. c-Myc associates with ribosomal DNA and activates RNA polymerase I transcription // *Nat. Cell Biol.* V. 7. 2005. P. 303–310.
20. Grandori C., Gomez-Roman N., Felton-Edkins Z.A. et al. c-Myc binds to human ribosomal DNA and stimulates transcription of rRNA genes by RNA polymerase I // *Nat. Cell Biol.* 2005. V. 7. P. 311–318.
21. Thomas G.M., Frame S., Goedert M. et al. A GSK3-binding peptide from FRAT1 selectively inhibits the GSK3-catalysed phosphorylation of axin and beta-catenin // *FEBS Lett.* 1999. V. 458. P. 247–251.
22. Li L., Yuan H., Weaver C.D. et al. Axin and Frat1 interact with dvl and GSK, bridging Dvl to GSK in Wnt-mediated regulation of LEF-1 // *EMBO J.* 1999. V. 18. P. 4233–4240.
23. Tsang C.K., Liu H., Zheng X.F. mTOR binds to the promoters of RNA polymerase I- and III-transcribed genes // *Cell Cycle.* 2010. V. 9. P. 953–957.
24. Von Walden F., Liu C., Aurigemma N., Nader G.A. mTOR signaling regulates myotube hypertrophy by modulating protein synthesis, rDNA transcription, and chromatin remodeling // *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* 2016. V. 311. P. 663–672.

25. Schnapp A., Pfeleiderer C., Rosenbauer H., Grummt I. A growth-dependent transcription initiation factor (TIF-IA) interacting with RNA polymerase I regulates mouse ribosomal RNA synthesis // *EMBO J.* 1990. V. 9. P. 2857–2863.
26. Machida M., Takeda K., Yokono H. et al. Reduction of ribosome biogenesis with activation of the mTOR pathway in denervated atrophic muscle // *J. Cell. Physiol.* 2012. V. 227. P. 1569–1576.
27. Liu R., Iadevaia V., Averous J. et al. Impairing the production of ribosomal RNA activates mammalian target of rapamycin complex 1 signalling and downstream translation factors // *Nucleic Acids Res.* 2014. V. 42. P. 5083–5096.
28. West D.W., Baehr L.M., Marcotte G.R. et al. Acute resistance exercise activates rapamycin-sensitive and -insensitive mechanisms that control translational activity and capacity in skeletal muscle // *J. Physiol.* 2016. V. 594. P. 453–468.
29. Stec M.J., Mayhew D.L., Bamman M.M. The effects of age and resistance loading on skeletal muscle ribosome biogenesis // *J. Appl. Physiol.* 2015. V. 119. P. 851–857.
30. Figueiredo V.C., Caldwell M.K., Massie V. et al. Ribosome biogenesis adaptation in resistance training-induced human skeletal muscle hypertrophy // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2015. V. 309. P. 72–83.
31. Kirby T.J., Lee J.D., England J.H. et al. Blunted hypertrophic response in aged skeletal muscle is associated with decreased ribosome biogenesis // *J. Appl. Physiol.* 2015. V. 119. P. 321–327.
32. Nader G.A., McLoughlin T.J., Esser K.A. mTOR function in skeletal muscle hypertrophy: increased ribosomal RNA via cell cycle regulators // *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* 2005. V. 289. P. 1457–1465.
33. Haddad F., Baldwin K.M., Tesch P.A. Pretranslational markers of contractile protein expression in human skeletal muscle: effect of limb unloading plus resistance exercise // *J. Appl. Physiol.* 2005. V. 98. P. 46–52.
34. Young V.R. The role of skeletal and cardiac muscle in the regulation of protein metabolism // *Mammalian protein metabolism* / H.N. Munro, ed. N.Y., 1970. P. 586–657.
35. Ferrando A.A., Paddon-Jones D., Wolfe R.R. Alterations in protein metabolism during space flight and inactivity // *Nutrition.* 2002. V. 18. P. 837–841.
36. Bettany G.E., Ang B.C., Georgiannos S.N. et al. Bed rest decreases whole-body protein turnover in post-absorptive man // *Clin. Sci. (Lond.).* 1996. V. 90. P. 73–75.
37. Fiorotto M.L., Sosa H.A., Davis T.A. In vivo measurement of muscle protein synthesis rate using the flooding dose technique // *Methods Mol. Biol.* 2012. V. 798. P. 245–264.
38. Gibson J.N., Halliday D., Morrison W.L. et al. Decrease in human quadriceps muscle protein turnover consequent upon leg immobilization // *Clin. Sci. (Lond.).* 1987. V. 72. P. 503–509.
39. Wall B.T., Snijders T., Senden J.M. et al. Disuse impairs the muscle protein synthetic response to protein ingestion in healthy men // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2013. V. 98. P. 4872–4881.
40. Ferrando A.A., Lane H.W., Stuart C.A. et al. Prolonged bed rest decreases skeletal muscle and whole body protein synthesis // *Am. J. Physiol.* 1996. V. 270. P. 627–633.
41. Paddon-Jones D., Sheffield-Moore M., Cree M.G. et al. Atrophy and impaired muscle protein synthesis during prolonged inactivity and stress // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2006. V. 91. P. 4836–4841.
42. Glover E.I., Phillips S.M., Oates B.R. et al. Immobilization induces anabolic resistance in human myofibrillar protein synthesis with low and high dose amino acid infusion // *J. Physiol.* 2008. V. 586. P. 6049–6061.
43. De Boer M.D., Selby A., Atherton P. et al. The temporal responses of protein synthesis, gene expression and cell signalling in human quadriceps muscle and patellar tendon to disuse // *J. Physiol.* 2007. V. 585. P. 241–251.
44. Wall B.T., Dirks M.L., Snijders T. et al. Short-term muscle disuse lowers myofibrillar protein synthesis rates and induces anabolic resistance to protein ingestion // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2016. V. 310. P. 137–147.
45. Goldspink D.F. The influence of immobilization and stretch on protein turnover of rat skeletal muscle // *J. Physiol.* 1977. V. 264. P. 267–282.
46. Goldspink D.F., Morton A.J., Loughna P., Goldspink G. The effect of hypokinesia and hypodynamia on protein turnover and the growth of four skeletal muscles of the rat // *Pflugers Arch.* 1986. V. 407. P. 333–340.
47. Munoz K.A., Satarug S., Tischler M.E. Time course of the response of myofibrillar and sarcoplasmic protein metabolism to unweighting of the soleus muscle // *Metabolism.* 1993. V. 42. P. 1006–1012.
48. Fluckey J., Dupont-Versteegden E., Knox M. et al. Insulin facilitation of muscle protein synthesis following resistance exercise in hindlimb-suspended rats is independent of a rapamycin-sensitive pathway // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2004. V. 287. P. 1070–1075.
49. Taillandier D., Bigard X., Desplanches D. et al. Role of protein intake on protein synthesis and fiber distribution in the unweighted soleus muscle // *J. Appl. Physiol.* 1993. V. 75. P. 1226–1232.
50. Taillandier D., Guezennec C.Y., Patureau-Mirand P. et al. A high protein diet does not improve protein synthesis in the nonweight-bearing rat tibialis anterior muscle // *J. Nutr.* 1996. V. 126. P. 266–272.
51. Fluckey J.D., Dupont-Versteegden E.E., Montague D.C. et al. A rat resistance exercise regimen attenuates losses of musculoskeletal mass during hindlimb suspension // *Acta Physiol. Scand.* 2002. V. 176. P. 293–300.
52. Goodman C.A., Mabrey D.M., Frey J.W. et al. Novel insights into the regulation of skeletal muscle protein synthesis as revealed by a new nonradioactive in vivo technique // *FASEB J.* 2011. V. 25. P. 1028–1039.
53. You J.S., Anderson G.B., Dooley M.S., Hornberger T.A. The role of mTOR signaling in the regulation of protein synthesis and muscle mass during immobilization in mice // *Dis. Model Mech.* 2015. V. 8. P. 1059–1069.
54. Mirzoev T., Tyganov S., Vilchinskaya N. et al. Key Markers of mTORC1-dependent and mTORC1-independent

signaling pathways regulating protein synthesis in rat soleus muscle during early stages of hindlimb unloading // *Cell. Physiol. Biochem.* 2016. V. 39. P. 1011–1020.

55. Mirzoev T.M., Tyganov S.A., Shenkman B.S. Akt-dependent and Akt-independent pathways are involved in protein synthesis activation during reloading of disused soleus muscle // *Muscle & Nerve.* 2017. V. 55. P. 393–399.

56. Baehr L.M., West D., Marshall A.G. et al. Muscle-specific and age-related changes in protein synthesis and protein degradation in response to hindlimb unloading in rats // *J. Appl. Physiol.* 2017. V. 122. P. 1336–1350.

57. Babij P., Booth F.W. Alpha-actin and cytochrome c mRNAs in atrophied adult rat skeletal muscle // *Am. J. Physiol.* 1988. V. 254. P. 651–656.

58. Bajotto G., Sato Yu., Kitaura Yu., Shimomura Yu. Effect of branched-chain amino acid supplementation during unloading on regulatory components of protein synthesis in atrophied soleus muscles // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. P. 1815–1828.

59. Heinemeier K.M., Olesen J.L., Haddad F. et al. Effect of unloading followed by reloading on expression of collagen and related growth factors in rat tendon and muscle // *J. Appl. Physiol.* 2009. V. 106. P. 178–186.

60. Baehr L.M., West D.W., Marcotte G. et al. Age-related deficits in skeletal muscle recovery following disuse are associated with neuromuscular junction instability and ER stress, not impaired protein synthesis // *Aging.* 2016. V. 8. P. 127–146.

61. Petersson B., Wernerman J., Waller S.O. et al. Elective abdominal surgery depresses muscle protein synthesis and increases subjective fatigue: effects lasting more than 30 days // *Br. J. Surg.* 1990. V. 77. P. 796–800.

62. Gamrin L., Berg H.E., Essén P. et al. The effect of unloading on protein synthesis in human skeletal muscle // *Acta Physiol. Scand.* 1998. V.163. P. 369–377.

63. Kirby T.J., Lee J.D., England J.H. et al. Blunted hypertrophic response in aged skeletal muscle is associated with decreased ribosome biogenesis // *J. Appl. Physiol.* 2015. V. 119. P. 321–327.

Поступила 07.05.2018

RIBOSOME BIOGENESIS AND HYPOGRAVITY-INDUCED ATROPHY OF MAMMALIAN SKELETAL MUSCLES

Mirzoev T.M., Shenkman B.S.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 5–12

Reduction of the skeletal muscle contractile activity due to extended bed rest, immobilization of extremities or exposure in equally real and modeled microgravity leads to atrophic developments behind which is lowered intensity of protein synthesis. Intensity of protein synthesis in skeletal muscle is dependent as on translational efficiency, so translational capacity. Translational efficiency means the rate of protein synthesis on a given ribosome, whereas translational capacity is primarily a number of ribosomes per a tissue unit and, therefore, depends on ribosome biogenesis. However, the role of ribosome biogenesis in protein synthesis regulation in unloaded skeletal muscles of mammals remains poorly understood. The purpose of the review is to reveal molecular mechanisms determining the translational capacity and to analyze literary data about effects of unloading on key markers of ribosome biogenesis in the skeletal muscle.

Key words: functional unloading, m. soleus, protein synthesis, ribosome biogenesis.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 629.786+613.6

ПЕРЕНОСИМОСТЬ ПЕРЕГРУЗОК РОССИЙСКИМ КОСМОНАВТОМ И АМЕРИКАНСКИМ АСТРОНАВТОМ НА УЧАСТКЕ СПУСКА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «СОЮЗ» С ОРБИТЫ НА ЗЕМЛЮ В 340-СУТОЧНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Котовская А.Р., Колотева М.И., Глебова Т.М.

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

E-mail: btm@imbp.ru

Впервые проведена оценка переносимости перегрузок направления «грудь – спина» (+Gx) российским космонавтом (55 лет, 2-й полет) и американским астронавтом (51 год, 4-й полет) на этапе штатного спуска космического корабля (КК) «Союз» с орбиты на Землю с борта Международной космической станции (МКС) в космическом полете (КП) продолжительностью 340 сут, совершенного в 2015–2016 гг.

Переносимость перегрузок российским космонавтом на заключительном этапе спуска КК «Союз» после 340-суточного пребывания в невесомости на основании анализа субъективных ощущений и данных объективной физиологической информации оценена удовлетворительной. Однако следует отметить появление у него после посадки КК «Союз» на Землю кратковременных признаков ортостатической неустойчивости в виде нарушения зрения – «серой пелены» при вставании, которое по существу является предвестником обморока, не получившее негативного развития, на фоне отчетливых вестибуловегетативных расстройств (ВВР) – головокружения, тошноты, трудности в сохранении равновесия и нарушения координации движений при ходьбе, ощущения общего дискомфорта, что в целом свидетельствует об ухудшении переносимости перегрузок в 340-суточном КП по сравнению с переносимостью перегрузок до КП.

Поскольку с 2009 г. опрос астронавтов и их осмотр после полета не проводятся, переносимость перегрузок американским астронавтом на заключительном этапе полета оценивалась только на основании анализа объективной физиологической информации, которая позволила считать ее удовлетворительной.

Ключевые слова: 340-суточный космический полет, переносимость человеком перегрузок на этапе спуска.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 13–18.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-13-18

Многолетняя практика пилотируемых космических полетов (КП) по околоземной орбите длительностью от 6 мес до 1 года и более (437 сут)

свидетельствует о том, что у всех космонавтов, несмотря на использование в ходе КП различных мер профилактики, развивается детренированность сердечно-сосудистой системы (ССС) на фоне общей астенизации организма.

Действительно, по данным Газенко О.Г. (1984), Григорьева А.И., Егорова А.Д. (1977, 1988), пребывание в невесомости приводит к детренированности организма, снижению его функциональных возможностей и работоспособности независимо от продолжительности КП [1–3]. Известно, что длительное воздействие невесомости существенно снижает устойчивость организма к перегрузкам [4, 5]. Невесомость приводит к детренированности ССС, что не может не сказаться на переносимости перегрузок на ответственном этапе спуска с орбиты. По данным Григорьева А.И., Степанцова В.И. и др. (1986), Григорьева А.И., Какурина Л.И. и др. (1987), Козловской И.Б., Степанцова В.И. и др. (2001), накопленным в ходе медицинских наблюдений в КП, показано, что при использовании целого комплекса профилактических средств доказана возможность длительной, вплоть до 1,5 года, жизни в условиях невесомости [6–8]. В то же время многолетний опыт изучения переносимости космонавтами перегрузок на участке спуска космического корабля (КК) на Землю свидетельствует о снижении устойчивости к перегрузкам. Как показано в работах Котовской А.Р., Виль-Вильямс И.Ф. и др. (1993, 1997, 2001), на заключительном этапе длительных КП (до 8 мес) на орбитальной станции (ОС) «Мир», несмотря на использование штатного комплекса средств профилактики в полете, переносимость перегрузок существенно ухудшалась, вплоть до появления признаков срыва физиологических компенсаторных механизмов (зрительных расстройств и относительной брадикардии) [9, 10]. Кроме того, в настоящее время на этом фоне у 10 человек зарегистрировано возникновение обморочных состояний сразу после приземления или спустя несколько часов при

попытке космонавтов принять вертикальное положение, что потребовало оказания им специализированной медицинской помощи [11, 12].

Это означает, что длительные КП по-прежнему заслуживают самого пристального внимания, учитывая, что к настоящему времени советскими и российскими космонавтами осуществлено всего 5 полетов продолжительностью от 311 до 437 сут на ОС «Мир» и только 1 КП на Международную космическую станцию (МКС) продолжительностью 340 сут, совершенный российским космонавтом и американским астронавтом.

Авторами данной статьи впервые оценена переносимость перегрузок российским космонавтом и американским астронавтом на этапе спуска КК «Союз» с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости.

Методика

Проанализированы данные по переносимости перегрузок направления «грудь – спина» (+Gx) российским космонавтом (55 лет, 2-й полет) и американским астронавтом (51 год, 4-й полет) на участке штатного спуска КК «Союз» с орбиты на Землю в КП продолжительностью 340 сут, совершенном в 2015–2016 гг.

Во время КП российский космонавт использовал комплекс средств профилактики неблагоприятного влияния невесомости на организм, включавший физические и ОДНТ-тренировки. Накануне спуска КК «Союз» с орбиты на Землю российский космонавт и американский астронавт в соответствии с рекомендациями приняли водно-солевые добавки (ВСД).

На участке спуска с орбиты на Землю в КК «Союз» российский космонавт и американский астронавт находились в индивидуально профилированных ложементах с углом наклона спинки кресла 78–80° к вектору перегрузки. В качестве индивидуального средства противоперегрузочной защиты космонавт и астронавт использовали противоперегрузочный костюм (ППК) «Кентавр».

Максимальная величина перегрузок направления «грудь – спина» (+Gx) при прохождении плотных слоев атмосферы на участке возвращения КК «Союз» с орбиты на Землю составляла 4,53 ед. Величины перегрузок при вводе тормозного и основного парашютов были равны 5,23 и 3,38 ед. соответственно, при перецепке основного парашюта на симметричную подвеску – 4,77 ед., при включении двигателя мягкой посадки (ДМП) – 1,03 ед., при касании земли – 10,49 ед.

Переносимость перегрузок российским космонавтом оценивалась на основе анализа субъективных ощущений: зрительных расстройств, затруднений дыхания и речи, вестибуловегетативных реакций (ВВР) при собеседовании и по результатам

заполнения им специальной анкеты после полета, а также анализа данных объективной физиологической информации — изменений электрокардиограммы (ЭКГ): нарушения сердечного ритма, длительность интервалов PQ и QRS, частоты сердечных сокращений (ЧСС) и частоты дыхания (ЧД), получаемой с помощью штатной аппаратуры медицинского контроля. Регистрация физиологической информации на этапе спуска КК «Союз» с орбиты на Землю начиналась за 30 мин до вхождения его в плотные слои атмосферы.

После окончания полета, через ~14 ч после посадки, на базе ФГУП «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» нами проводился опрос российского космонавта о переносимости им перегрузок на участке спуска КК «Союз» с орбиты на Землю, а также осмотр кожных покровов космонавта с целью выявления петехиальных кровоизлияний в кожные покровы спины, связанных с действием перегрузок.

Так как с 2009 г. опрос астронавтов и их осмотр после полета не проводится, переносимость перегрузок американским астронавтом на заключительном этапе полета оценивалась только на основании анализа объективной физиологической информации.

Физиологические показатели российского космонавта и американского астронавта, зарегистрированные при действии перегрузок в КП, сопоставлялись с соответствующими показателями во время их дополетных обследований по аналогичному графику на наземной центрифуге (ЦФ).

Результаты и обсуждение

Данные объективной физиологической информации российского космонавта и американского астронавта на этапе спуска КК «Союз» с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости представлены в таблице. За 30 мин до входа КК «Союз» в плотные слои атмосферы российский космонавт чувствовал себя удовлетворительно, испытывал волнение, связанное с предстоящим этапом спуска. В этот период ЧСС у него составляла 80 уд/мин, ЧД – 20 циклов/мин, на ЭКГ длительность интервала PQ составляла 0,13 с, комплекса QRS – 0,08 с (т.е. находилась в пределах нормы), нарушений сердечного ритма не отмечено.

На этапе прохождения КК плотных слоев атмосферы при максимальной величине перегрузок +Gx (4,53 ед) российский космонавт отметил сильное эмоциональное напряжение перед завершающим этапом КП; перегрузка вызвала у него смещение мягких тканей лица, возникли затруднения дыхания и речи. Субъективно величина перегрузки ощущалась им близко к реальной (4,5 ед). На этом участке полета ЧСС у него возросла до 110 уд/мин, ЧД – до 31 цикла/мин. На ЭКГ патологических изменений не

Таблица

Физиологические показатели российского космонавта и американского астронавта на этапе спуска КК «Союз» с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости

Показатели	Космонавт/астронавт	За 30 мин до спуска с орбиты	Участок спуска с орбиты на Землю				
			Спуск* (длительно действующие перегрузки) 4,53 ед.	Ввод парашютов, 5,23 и 3,38 ед.	Перецепка, 4,77 ед.	Полет на парашюте	Касание Земли (ударные перегрузки) 10,49 ед.
ЧСС, ударов/мин	Космонавт	80	110	125	116	111	102
	Астронавт	81	101	108	102	97	91
ЧД, циклов/мин	Космонавт	20	31	24	22	22	28
	Астронавт	14	24	15	20	20	22
Нарушения сердечного ритма	Космонавт	Нет нарушений ритма					2 Ex*
	Астронавт	Нет нарушений ритма					
Изменение амплитуды зубца Т, мм	Космонавт	5	4,5	3,7	3,6	2,8	3,3
	Астронавт	4	3	4	3	1,9	3,7
Интервал PQ, с	Космонавт	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12-0,15	0,12
	Астронавт	0,14–0,2	0,16	0,2	0,2	0,2	0,2
Комплекс QRS, с	Космонавт	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	Астронавт	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Примечание. * – прохождение плотных слоев атмосферы; [#]Ex – экстрасистолы.

зарегистрировано: длительность интервала PQ составляла 0,13 с, комплекса QRS – 0,08 с (в пределах нормы), нарушений сердечного ритма не отмечено.

Следующий важный этап спуска КК с орбиты на Землю (парашютирование) включает в себя фазы ввода тормозного и основного парашюта, перецепку его на симметричную подвеску и полет на парашюте (рисунок). На этом участке полета перецепка парашюта на симметричную подвеску приобретает особую значимость, поскольку в этот период происходит закрутка и раскачка спускаемого аппарата (СА) на стропях парашюта, что обуславливает возникновение ВВР у членов экипажа. На этом участке спуска КК с орбиты российский космонавт испытал ВВР в виде головокружения, а с целью профилактики дальнейшего ухудшения общего состояния он ограничивал движения головой. По данным объективной физиологической информации, ЧСС у него в этот период колебалась от 125 до 111 уд/мин, ЧД – от 24 до 22 циклов/мин. На ЭКГ длительность интервала PQ составляла 0,12 с, комплекса QRS – 0,08 с (в пределах нормы). Нарушений сердечного ритма не зарегистрировано.

При действии ударных перегрузок приземления величиной 10,49 ед. российский космонавт чувствовал себя удовлетворительно, однако отметил «жесткий» удар в спину со стороны днища СА при касании грунта. Сохранялись тахикардия (102 уд/мин) и тахипноэ (28 циклов/мин).

После посадки при выходе из СА у российского космонавта появились кратковременные признаки ортостатической неустойчивости в виде нарушения зрения – «серой пелены» при вставании (является предвестником обморока), которая не получила негативного развития, а также отчетливые ВВР: головокружение, тошнота, трудность в сохранении равновесия и нарушение координации движений при ходьбе на фоне общего дискомфорта.

При осмотре через ~14 ч после посадки на базе ФГУП «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» у российского космонавта сохранялись ВВР в виде пошатывания при ходьбе. На коже спины обнаружены мелкоочечные петехиальные кровоизлияния по задней

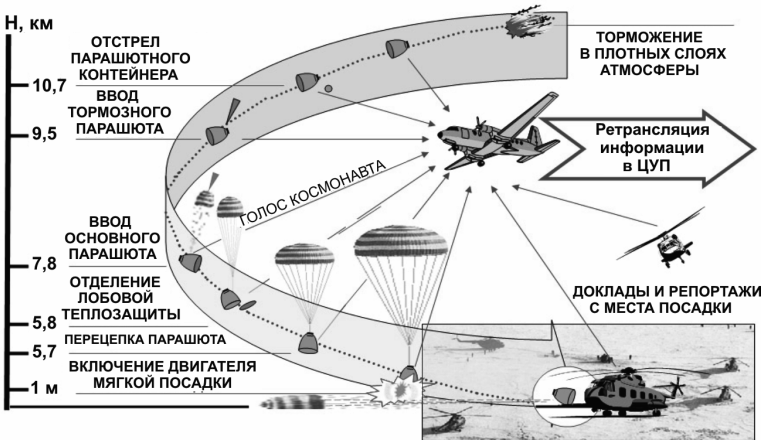


Рисунок. Этап парашютирования на участке спуска КК «Союз» с орбиты на Землю (после этапа прохождения плотных слоев атмосферы)

аксиллярной линии справа в виде полосы размером 10 x 0,5 см, обусловленные перераспределением крови при действии перегрузок направления «грудь – спина» (+Gx) на этапе прохождения КК плотных слоев атмосферы. В области поясницы обнаружен кровоподтек, возникший, вероятно, при действии ударных перегрузок при посадке СА на Землю.

Полученные данные по субъективным ощущениям российского космонавта и объективной физиологической информации на этапе спуска КК с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости свидетельствуют об удовлетворительной переносимости перегрузок.

Как видно из приведенной таблицы, за 30 мин до входа КК «Союз» в плотные слои атмосферы ЧСС американского астронавта составляла 80 уд/мин, ЧД – 14 циклов/мин. На ЭКГ отмечено колебание длительности интервала PQ в пределах 0,14–0,2 с, длительность комплекса QRS составила 0,12 с (в пределах нормы). Нарушения сердечного ритма отсутствовали.

При прохождении плотных слоев атмосферы на этапе спуска КК «Союз» с орбиты на Землю максимальная величина ЧСС американского астронавта составляла 101 уд/мин, ЧД – 24 цикла/мин. На ЭКГ длительность интервала PQ составила 0,16 с, комплекса QRS – 0,12 с (в пределах нормы). Нарушений ритма зарегистрировано не было.

На этапе парашютирования ЧСС американского астронавта колебалась в пределах от 97 до 108 уд/мин, ЧД – от 15 до 20 циклов/мин. На ЭКГ длительность интервала PQ увеличилась до верхней границы нормы – 0,2 с, длительность комплекса QRS составляла, как и на предыдущем этапе, 0,12 с. Нарушений сердечного ритма не отмечено.

При касании земли величины ЧСС и ЧД у американского астронавта составляли 91 уд/мин и 22 цикла/мин соответственно, однако при действии ударных перегрузок приземления (10,49 ед.) на ЭКГ зарегистрированы нарушения сердечного ритма в виде однократного эпизода парной предсердной экстрасистолии (см. табл.).

Полученные данные объективной физиологической информации о состоянии американского астронавта на этапе спуска КК с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости, свидетельствуют об удовлетворительной переносимости перегрузок. При действии ударных перегрузок приземления в качестве особенности у астронавта на ЭКГ отмечены признаки внутрипредсердной и желудочковой проводимости (увеличение длительности интервалов PQ и QRS до 0,2 и 0,12 с соответственно) в сочетании с нарушениями ритма в виде эпизода парной предсердной экстрасистолии.

Было проведено сравнение степени «напряжения» физиологических систем организма российского космонавта и американского астронавта при

действии перегрузок после 340-суточного пребывания в невесомости и в наземных условиях на ЦФ по аналогичному графику перегрузок. Со слов российского космонавта, члены экипажа перед спуском и во время спуска испытывали закономерное волнение, особенно учитывая тот факт, что у американского астронавта (3-й КП) не было предшествующего опыта спуска на КК типа «Союз». По данным объективной физиологической информации при действии перегрузок на этапе реального спуска КК «Союз» с орбиты на Землю величина ЧСС российского космонавта составляла 110 уд/мин, ЧД – 31 циклов/мин, а в наземных условиях до КП при вращениях на ЦФ – 72 уд/мин и 17 циклов/мин соответственно; значения ЧСС американского астронавта при действии перегрузок составляли 101 уд/мин, ЧД – 24 цикла/мин (на ЦФ – 66 уд/мин и 9 циклов/мин соответственно). Иными словами, при сравнении указанных показателей в условиях реального КП степень «напряжения» физиологических систем российского космонавта и американского астронавта при действии перегрузок спуска после КП увеличилась в 1,5–2 раза по сравнению с испытаниями на Земле.

Таким образом, существующая система профилактики неблагоприятного воздействия невесомости, применяемая в ходе полета, не предотвращает детренированности ССС и организма человека в целом и не сохраняет переносимость космонавтами перегрузок на исходном предполетном уровне.

У российского космонавта в результате 340-суточного пребывания в невесомости были отмечены признаки детренированности ССС на фоне появления ВВР, что в целом свидетельствует о снижении переносимости перегрузок в КП по сравнению с переносимостью до полета.

Перецепка основного парашюта на симметричную подвеску (на этом этапе происходит закрутка и раскачка СА на стропах парашюта) является сильным воздействием на вестибулярный аппарат космонавтов и служит причиной возникновения ВВР в виде тошноты и рвоты, которые после выхода из СА могут усилиться и к ним может добавиться нарушение походки и трудность сохранения координации при движении.

В целом, несмотря на то что переносимость перегрузок на заключительном этапе спуска КК «Союз» на Землю после КП продолжительностью 340 сут у российского космонавта и американского астронавта оценена удовлетворительной, в настоящее время нельзя делать окончательных выводов применительно к будущим полетам длительностью год и более.

Выводы

1. Переносимость перегрузок штатного режима с максимальной величиной 4,53 ед. российским

космонавтом и американским астронавтом на участке спуска КК «Союз» с орбиты на Землю после 340-суточного пребывания в невесомости соответствует удовлетворительной: физиологические реакции организма на воздействие перегрузок носили умеренный характер, критических признаков, ограничивающих переносимость перегрузок, не наблюдалось.

2. После посадки у российского космонавта отмечены кратковременные признаки ортостатической неустойчивости в виде нарушения зрения – «серой пелены» при вставании (предвестника обморока), которое не получило негативного развития, на фоне отчетливых ВВР в виде головокружения, тошноты, трудности в сохранении равновесия и нарушения координации движений при ходьбе на фоне общего дискомфорта.

3. Необходимо продолжить исследование переносимости перегрузок космонавтами при спуске КК с орбиты после полетов длительностью год и более.

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН № 65.1; номер госрегистрации 01201370667.

Список литературы

1. Газенко О.Г. Человек в космосе // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1984. Т. 18. № 1. С. 3–8.
2. Gazenko O.G. Man in space // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1984. V. 18. № 1. P. 3–8.
3. Григорьев А.И., Егоров А.Д. Феноменология и механизмы изменения основных функций организма человека в невесомости // Там же. 1988. Т. 22. № 6. С. 4–17.
4. Grigoriev A.I., Egorov A.D. The phenomenology and mechanisms of change of the basic functions of the human body in weightlessness // Ibid. 1988. V. 22. № 6. P. 4–17.
5. Григорьев А.И., Егоров А.Д. Длительные космические полеты // Космическая биология и медицина. Совм. рос.-амер. изд.: В 5 т. / В.В. Антипов, А.И. Григорьев (РФ), К. Лич Хантун (США), ред. 1997. Т. 3. Кн. 2. С. 368–447.
6. Grigoriev A.I., Egorov A.D. Long-term flights // Space biology and medicine. Joint Russian-American publication: in 5 v. / V.V. Antipov, A.I. Grigoriev (Russia), K. Leach Hanton (USA), eds. 1997. V. 3. B. 2. P. 368–447.
7. Котовская А.Р., Вартбаронов Р.А. Длительные линейные ускорения // Там же. С. 10–67.
8. Kotovskaya A.R., Vartbaronov R.A. Sustained linear acceleration // Ibid. P. 10–67.
9. Котовская А.Р., Виль-Вильямс И.Ф. Переносимость космонавтами перегрузок +Gx // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 500–551.
10. Kotovskaya A.R., Vil-Vilyams I.F. Tolerability of astronauts to +Gx overloads // Space Station «Mir». Moscow, 2001. V. 1. P. 500–551.
11. Григорьев А.И., Степанцов В.И., Тишлер В.А. и др. Средства и методы профилактики неблагоприятного влияния невесомости // Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6» – «Союз». М., 1986. С. 125–144.
12. Grigoriev A.I., Stepantsov V.I., Tishler V.A. et al. Means and methods of prevention of adverse effects of weightlessness // Results of medical research performed on the orbital research complex «Salyut-6» – «Soyuz». Moscow, 1986. P. 125–144.
13. Григорьев А.И., Какурин Л.И., Пестов И.Д. и соавт. Защита организма от неблагоприятного влияния невесомости // Космическая биология и медицина: Руководство по физиологии. Москва, 1987. С. 50–87.
14. Grigoriev A.I., Kakurin L.I., Pestov I.D. et al. Protecting the body from the adverse effects of weightlessness // Space biology and medicine: Guide to Physiology. Moscow, 1987. P. 50–87.
15. Козловская И.Б., Степанцов В.И., Егоров А.Д. Физические тренировки в длительных полетах // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 393–414.
16. Kozlovskaya I.B., Stepantsov V.I., Egorov A.D. Physical training in long flights // Space Station «Mir». Moscow, 2001. V. 1. P. 393–414.
17. Котовская А.Р., Виль-Вильямс И.Ф. Переносимость космонавтами перегрузок «грудь – спина» (+Gx) на участке спуска с орбиты на кораблях «Союз-Т» и «Союз-ТМ» // Авиакосм. и экол. мед. 1993. Т. 27. № 5–6. С. 52–58.
18. Kotovskaya A.R., Vil-Vilyams I.F. The tolerability of astronauts to «chest – back» (+Gx) overloads at the stage of returning to Earth on board the «Soyuz» and «Soyuz-TM» spacecrafts // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1993. V. 27. № 5–6. P. 52–58.
19. Котовская А.Р., Виль-Вильямс И.Ф., Елизаров С.Ю. и др. Переносимость перегрузок +Gx врачом-космонавтом В.В. Поляковым на активных участках космического полета длительностью 438 суток // Там же. 1997. Т. 31. № 1. С. 29–34.
20. Kotovskaya A.R., Vil-Vilyams I.F., Elizarov S.Yu. et al. Tolerance of +Gx loads by space physician V.V. Polyakov during the active phases of his 438-day space mission // Ibid. 1997. V. 31. № 1. P. 29–34.
21. Котовская А.Р., Колотева М.И. Проявление де-тренированности сердечно-сосудистой системы человека на этапе возвращения на Землю после пребывания в невесомости // Там же. 2016. Т. 50. № 1. С. 13–16.
22. Kotovskaya A.R., Koloteva M.I. Development of the deconditioning of the cardiovascular system of man at the stage of returning to Earth after weightlessness // Ibid. 2016. V. 50. № 1. P. 13–16.
23. Котовская А.Р. Переносимость человеком перегрузок в космических полетах и искусственная гравитация // Там же. 2017. Т. 51. № 5. С. 5–21.
24. Kotovskaya A.R. Human tolerance of G-loads in space missions and artificial gravity // Ibid. 2017. V. 51. № 5. P. 5–21.

Поступила 23.05.2018

TOLERANCE OF G-LOADS BY THE RUSSIAN COSMONAUT AND NASA ASTRONAUT DURING THE «SOYUZ» SPACE VEHICLE DE-ORBIT AFTER THE 340-DAY MISSION TO THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Kotovskaya A.R., Koloteva M.I., Glebova T.M.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).
2018. V. 52. № 5. P. 13–18

Tolerance of the chest-to-back g-loads (+Gx) aboard the «Soyuz» transport vehicle was evaluated in the Russian cosmonaut (55 y.o., second mission) and NASA astronaut (51 y.o., fourth mission) after the 340-d stay on the ISS in 2015–2016.

According to the analysis of subjective sensations and objective physiological data, the cosmonaut's g-tolerance was satisfactory. However, it is pertinent to note that at the landing site he exhibited momentary symptoms of orthostatic instability including «the gray-out» when rising to his feet that usually precede syncope, and also salient vestibular symptoms such as vertigo, nausea, difficulty with balance maintenance, locomotor ataxia during walking and feeling of general discomfort that together suggest decline of g-tolerance in comparison with the results of pre-flight g-testing.

Since 2009 astronauts have not been interviewed or examined immediately after landing and for this reason g-tolerance of the NASA astronaut was evaluated as satisfactory based on analysis of objective physiological information only.

Key words: 340-day space mission, human tolerance of de-orbit g-loads.

УДК 89.27.29

ДИАГНОСТИКА И ЛЕЧЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «МИР» И МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Богомолов В.В., Поляков А.В., Попова И.И., Ковачевич И.В., Алферова И.В., Репенкова Л.Г.

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

E-mail: repenkova@imbp.ru

Целью работы являлись анализ стоматологических заболеваний, зарегистрированных при работе экспедиций на орбитальной станции (ОС) «Мир» и Международной космической станции (МКС), а также оценка проведенных лечебно-диагностических мероприятий.

В течение полетов на ОС (28 экспедиций на ОС «Мир» и 50 экспедиций на МКС) у космонавтов было выявлено 9 случаев заболеваний стоматологического профиля. Из них 8 случаев были расценены как проявления зубного кариеса.

Для диагностики заболеваний зубочелюстной системы на МКС применялись бортовой телемедицинский комплект (ТБК-1) и стоматологический телемедицинский комплект (ТБК-1С) с разработанным к ним программным медицинским обеспечением (ПМО). При выполнении лечебных процедур использовался стоматологический инструментарий и стоматологические материалы из бортовой укладки.

Проведенные мероприятия, направленные на диагностику и оказание помощи при стоматологических заболеваниях космонавтов, были адекватны и эффективны. Все это помогло сохранить здоровье и работоспособность космонавтов, способствовало успешному выполнению программы космических полетов.

Ключевые слова: орбитальная станция, стоматологические заболевания, кариес зубов, телемедицинский бортовой комплект, видеоинформация.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 19–22.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-19-22

Проблемы, решаемые космической клинической медициной, занимают одно из ведущих мест в общей системе мер, обеспечивающей безопасность пилотируемых космических полетов (КП). В задачи клинической космической медицины входит сохранение жизни, здоровья и работоспособности членов экипажей, а в случае развития острых заболеваний или получения космонавтами различных поражений проведение адекватных лечебно-профилактических мероприятий [1–3].

Диагностика и лечение заболеваний стоматологического профиля в условиях пилотируемых КП

представляется довольно сложной проблемой, что обусловлено необходимостью наличия на борту орбитальных станций (ОС) стоматологического оснащения и достаточно высоким уровнем специальной подготовки членов космических экспедиций.

Целью работы являлись анализ стоматологических заболеваний, зарегистрированных при работе экспедиций на ОС «Мир» и Международной космической станции (МКС), и оценка проведенных лечебно-диагностических мероприятий.

Методика

На начальных этапах КП на ОС «Мир» диагностика стоматологических заболеваний проводилась путем анализа субъективных жалоб космонавтов с последующей консультативной помощью врача-стоматолога.

В дальнейшем применение телемедицинских технологий получения медико-биологической информации с российского сегмента (РС) МКС позволило внедрить современные методы и технологии передачи оперативной информации и унифицировать информационное обеспечение медико-биологических исследований на борту МКС [4].

Начиная с экспедиции МКС-15 в рамках первого этапа эксперимента «БИМС-1», в задачи которого входила отработка методов получения и обработки телемедицинской бортовой видеоинформации [5], проводилась видеосъемка и передача на Землю видеоизображений, отражающих состояние полости рта космонавтов. Использовался телемедицинский бортовой комплект (ТБК-1) (рис. 1), в состав которого входило разработанное специализированное ПМО «БИМС».

Для детализированных стоматологических исследований, начиная с экспедиции МКС-41, использовался специально разработанный для этих целей телемедицинский бортовой стоматологический комплект (ТБК-1С), включающий разработанное специализированное ПМО ТБК-1С, позволяющее проводить в бортовых условиях профессиональную интраоральную съемку зубных рядов,



Рис. 1. Выполнение космонавтом телемедицинских исследований с бортовым комплектом ТБК-1 на МКС



Рис. 2. Российская стоматологическая укладка на МКС

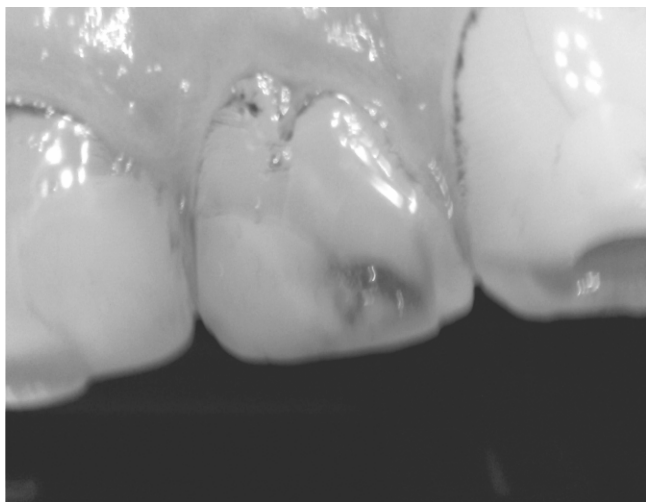


Рис. 3. Изображение зуба с дефектом пломбы, полученное с помощью телемедицинских методик

отдельных зубов и прилегающего к ним пародонта у космонавтов.

В работе проанализированы случаи развития заболеваний стоматологического профиля при полетах на ОС «Мир» (все 28 экспедиций) и на МКС (с 1-й по 50-ю экспедиции), а также результаты выполненных лечебных мероприятий.

У всех космонавтов, работавших на ОС «Мир» и МКС, в дополетном периоде по показаниям была проведена санация ротовой полости.

Лечебная помощь оказывалась с применением российской стоматологической укладки (на ОС «Мир»), а на МКС использовалась интегрированная система оказания медицинской помощи, в которую вошли американские стоматологические средства и российская медицинская укладка «Стоматология» А 02 (рис. 2).

В российскую медицинскую укладку «Стоматология» А 02, находящуюся на борту МКС, были включены стоматологический инструментарий (экскаватор двусторонний, штопфер-гладилка, зеркало стоматологическое, пинцет изогнутый стоматологический, зонд стоматологический), анестетик стоматологический, материал для временных пломб (дентин повязка), используемый в клинической практике для временного пломбирования зубов, мумифицирующая паста (нерезорбируемая паста для временного пломбирования корневых каналов), полировальная лента, валики стоматологические, резиновые перчатки, маски, салфетки антисептические спиртовые.

Указанные выше оборудование и материалы позволяли проводить установку временных пломб и сохранить целостность зубного аппарата космонавтов вплоть до окончания КП. Кроме того, в состав стоматологической укладки входит гель «Метрогил Дента», применяемый при инфекционно-воспалительных заболеваниях пародонта и слизистой оболочки полости рта, а также антибиотик широкого спектра действия и анальгетик из группы нестероидных противовоспалительных препаратов для перорального применения.

Результаты и обсуждение

Ниже приводятся случаи стоматологических заболеваний при полетах на ОС «Мир» и МКС.

При полетах 28 основных экспедиций на ОС «Мир» 2 из членов экипажей предъявляли жалобы на образование кариозной полости. В обоих этих случаях было рекомендовано закрытие дефекта зуба временным пломбирующим материалом с помощью стоматологического инструментария из российской стоматологической укладки.

При КП на МКС один из космонавтов на 169-е сутки полета предъявил жалобы на боль в области зуба, усиливающуюся при постукивании,

повышение температуры тела до субфебрильных значений. Указанная симптоматика могла свидетельствовать о развитии периодонтита.

По результатам проведенных обследований врач-стоматолог рекомендовал прием средств из группы нестероидных противовоспалительных препаратов, а также прием антибиотиков из группы пенициллинов. На 171-е сутки полета, по сообщению космонавта, указанные выше жалобы полностью прошли.

Еще у 1 космонавта на 44-е сутки КП был зафиксирован скол пломбы, а у другого на 45-е сутки полета возникли жалобы на скол зуба, при этом других болезненных проявлений со стороны полости рта не наблюдалось. Обоим космонавтам было рекомендовано проведение курса санитарно-гигиенических процедур полости рта.

В других случаях у 4 космонавтов были отмечены выпадения пломб или развитие их дефекта, сопровождавшиеся дискомфортными явлениями, в связи с чем им было рекомендовано провести установку временной пломбы, что позволило обеспечить герметичность кариозной полости.

Диагностика стоматологических заболеваний, возникших в условиях КП на МКС, была проведена не только на основе субъективных жалоб, но и с помощью анализа телемедицинской видеoinформации, полученной непосредственно с борта (рис. 3). Проведенные мероприятия, направленные на диагностику и оказание помощи при стоматологических заболеваниях космонавтов, были адекватны и эффективны, что позволило сохранить их здоровье и работоспособность и успешно выполнить программу КП. Большинство медицинских происшествий в КП, обусловленных стоматологическими заболеваниями, было расценено как проявление зубного кариеса.

Как известно, заболевания стоматологического профиля, по данным Всемирной организации здравоохранения, являются чрезвычайно распространенной проблемой в мире [6–8]. Кариес зубов – это процесс, обусловленный многофакторным состоянием полости рта со сложной этиологией [9–11].

В настоящее время результатом некоторых наиболее важных современных научных концепций являются следующие представления о кариесе зубов:

- зубной налет представляет собой сложную биопленку полости рта, которая обладает уникальными свойствами, сильно отличающимися от поведения входящих в ее состав планктонных микроорганизмов [12, 13];

- кариес зубов является результатом экологического сдвига в зубном налете: от непатогенной флоры в сторону патогенной [12, 13];

- кариес является процессом, а не конечной точкой, и до момента образования кариозной полости этот процесс может быть приостановлен или повернут вспять [14, 15];

- кариозный процесс в результате нарушения динамического равновесия между патологическими и защитными факторами в сторону доминирования патологических факторов может прогрессировать или может быть обращен вспять в случае преобладания защитных факторов [16, 17].

Существующие в настоящее время основные научные представления приводят к улучшению понимания сложных явлений, связанных с этиологией и патогенезом кариеса зубов, повышению важности факторов риска возникновения кариеса с учетом индивидуальной предрасположенности к возникновению кариеса [18], улучшению методов диагностики и измерения прогрессирования кариеса [5], появлению новых идей и мер по профилактике кариеса зубов [9].

При полетах на ОС «Мир» и МКС было зарегистрировано всего 8 случаев развития кариеса зубов, что, несомненно, связано с хорошей санацией полости рта в дополетном периоде, а также качественным выполнением космонавтами санитарно-гигиенических процедур для полости рта.

При возникновении кариеса зубов в течение длительных КП возможными причинами, как и в клинической практике, могут быть неудовлетворительная гигиена полости рта (недостаточный уход за зубами и их нерегулярная чистка), снижение иммунных свойств организма, монотонное питание, в частности отсутствие в рационе сырых овощей и фруктов, наследственная предрасположенность организма к кариесу, а также наличие проблемных пломб [19, 20].

Выводы

1. У 9 российских космонавтов 28 основных экспедиций на ОС «Мир» и 50 экспедиций на МКС было зарегистрировано 8 случаев заболевания стоматологического профиля, в основном кариес зубов.

2. Использование телемедицинской аппаратуры ТБК-1 и ТБК-1С и разработанного к ней специализированного программного обеспечения позволило получать объективную медицинскую информацию о состоянии зубочелюстного аппарата членов космических экспедиций и выявить наличие патологии.

3. При выполнении лечебных процедур использовали стоматологический инструментарий и стоматологические материалы из бортовой укладки.

4. Проведенные мероприятия, направленные на диагностику и оказание помощи при стоматологических заболеваниях космонавтов, были адекватны и эффективны.

Список литературы

1. Григорьев А.И., Егоров А.Д. Феноменология и механизмы изменений основных функций организма в

невесомости // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1988. Т. 22. № 6. С. 20–26.

Grigoriev A.I., Egorov A.D. Phenomenology and mechanisms of changes in the basic functions of the organism in weightlessness // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1988. V. 22. № 6. P. 20–26.

2. Barratt M.R. In-flight medical diagnostic and treatment system // Space biology and medicine. Moscow, 2001. V. 4. P. 3. Ch. 5. P. 165–222.

3. Гончаров И.Б., Ковачевич И.В., Воробьев В.Е. Оказание медицинской помощи в полете, медицинское обеспечение на месте посадки спускаемого аппарата при приземлении экипажа // Международная космическая станция. Российский сегмент. М., 2011. Т 1. С. 159–167.

Goncharov I.B., Kovachevich I.V., Vorobev V.E. Medical assistance during the flight, medical care for the spacecrew on the landing spot // International Space Station. Russian Segment. Moscow, 2011. V. 1. P. 159–167.

4. Попова И.И., Орлов О.И., Гончаров И.Б. и др. Отработка технологий телемедицинского обеспечения медицинского сопровождения пилотируемых полетов при реализации первого этапа эксперимента «БИМС» // Там же. С. 219–228.

Popova I.I., Orlov O.I., Revyakin Yu.G. et al. Testing of telemedicine technologies providing medical support of manned flights at realization of the first phase of the experiment «BIMS» // Ibid. P. 219–228.

5. Попова И.И., Орлов О.И., Ревякин Ю.Г. Основные результаты реализации первого этапа космического эксперимента «БИМС» // Пилотируемые полеты в космос. Биомедицина и жизнеобеспечение. М., 2011. С. 64.

Popova I.I., Orlov O.I., Revyakin Yu.G. The basic results of realization of the first stage of space experiment «BIMS» // Manned flights in space. Biomedicine and life-support. Moscow, 2011. P. 64.

6. Cummins D. Dental caries: a disease that remains an actual problem. Public health and health in the 21st century. Research of revolutionary technology for caries prevention// J. Clin. Dent. 2003. V. 13. № 24 [Spec. Iss. A]. P. 1–14.

7. Taubman M.A., Nash D.A. The scientific and public-health imperative for a vaccine against dental carries // Nat. Rev. Immunol. 2006. V. 6. P. 553–563.

8. Cummins D., Bowen W.H. Biotechnology in oral care // Cosmetic Science and Technology Serie. 2006. V. 29. P. 323–352.

9. Marsh P. Dental plaque as microbial biofilms // Caries Res. 2004. V. 38. P. 204–211.

10. Ten Cate J.M. A new approach to the microbiology of dental plaque // Odontol. 2006. V 90. P. 1–9.

11. Kuramitsu H.K., He X., Lux R. et al. Interspecies interactions within oral microbial communities // Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2007. V. 71. P. 653–670.

12. Fejerskov O. Changing paradigms in concept on dental caries: consequence for oral health care // Caries. Res. 2004. V. 38. P. 182–191.

13. Brambilla E., Garcia-Godoy F., Stronmeger L. Principles of diagnosis and treatment in high-caries-risk subjects // Dent. Clin. North. 2000. V. 44. P. 507–540.

14. Caufield P.W., Griffin A.L. Dental caries. An infection and transmissible disease // Pediatr. Clin. North 2000. V. 47. P. 1000–1019.

15. Kidd E.A., Fejerskov O. What constitutes dental caries? Histopatology of carious enamel and dentin related to the action of cariogenic biofilms // J. Dent. Res. 2004. V. 83. P. 35–38.

16. Featherstone J.D. The caries balance: contributing factors and early detections //J. Calif. Dent. Assoc. 2003. V. 13. P. 129–133.

17. Featherstone J.D. Caries prevention and reversal based on the caries balance // Pediatr. Dent. 2006. V. 28. P. 128–132.

18. Reich E., Newbrun E. Caries-risk assessment // Int. Dent. J. 1999. V. 49. P. 15–26.

19. Frenken J.E., Peters M.C., Manton D.J. et al. Minimal intervention dentistry for managing dental caries-a review: report of a FDI task group // Int. Dent. J. 2012. V. 62. P. 223–243.

20. Киселева Е.А., Размахнина Е.М., Куприна И.В. Хронобиологические аспекты в формировании кариесрезистентности // Клин. стоматология. 2018. Т. 85. № 1. С. 8–10.

Kiseleva E.A., Razmakhnina E.M., Kuprina I.V. Chronobiological aspects in the formation of caries resistance // Klinicheskaya stomatologiya. 2018. V. 85. № 1. P. 8–10.

Поступила 17.05.2018

DIAGNOSTICS AND TREATMENT OF DENTAL PROFILE DISEASES IN THE MISSIONS TO ORBITAL STATION «MIR» AND THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Bogomolov V.V., Poliakov A.V., Popova I.I., Kovachevich I.V., Alferova I.V., Repenkova L.G.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 19–22

The purpose was to analyze dental problems documented in missions to the orbital station «Mir» and International space station (ISS), and to judge the effectiveness of their diagnostics and treatment.

During 28 «Mir» and 50 ISS missions there were 9 dental cases among cosmonauts. Eight cases were diagnosed as caries.

On the ISS, dental diagnostics is performed by means of telemedicine suite TBK-1 and dental telemedicine suite TBK-1C, and dedicated software. Therapy was provided using appropriate instruments and materials from the board kit.

Diagnostics and medical care of cosmonauts with dental problems were adequate and successful. They helped the cosmonauts to remain healthy and able-bodied to accomplish mission programs.

Key words: orbital station, dental disease, caries, telemedicine suite, video information.

УДК 159.9:629.78

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ АВТОБИОГРАФИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ КОСМОНАВТОВ

Гущин В.И.¹, Кувшинова О.Л.², Шалина О.С.³, Виноходова А.Г.¹, Зюдфелд П. (Suedfeld P.)⁴, Джонсон Ф.Дж. (Johnson Ph.J.)⁴

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

²ООО Центр тестирования и развития «Гуманитарные технологии», Москва

³Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова Минздрава РФ

⁴Университет Британской Колумбии, Ванкувер, Канада

E-mail: shalinaya@yandex.ru, kerik01@gmail.com

Статья посвящена методологическим аспектам исследования автобиографического опыта космонавтов. Рассказ о себе может оказаться информативным для психолога как проекция самооотношения, самосознания человека, особенностей его социальной сферы, жизненных перспектив, т.е. комплексных показателей психологического благополучия. В этом контексте особенно интересно исследование жизненного опыта не просто состоявшихся людей, но специалистов высокого уровня, чья жизнь во многом была определена профессией, требующей полной самоотдачи. Исследование автобиографических представлений этих специалистов осложнено недостаточной разработанностью методического инструментария, большим опытом прохождения членами отряда различных психологических тестов, а также необходимостью качественного подхода к работе с такими профессионалами наряду с учетом требований валидности и надежности результатов исследований. Автобиографический опыт космонавтов зачастую неоднозначен, сложен и полон конфликтов – как социальных, так и личностных. Прежде всего, это конфликт между ценностями семьи и профессии. В статье представлен ряд методических подходов и авторских модификаций методик изучения автобиографического опыта, которые были апробированы в ходе реализации совместного канадско-российского проекта «Прошлое, опыт и влияние космического полета: уроки опытных космонавтов» с участием 20 обследуемых, совершивших от 1 до 5 полетов на орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции.

Ключевые слова: космический полет, автобиография, ценности, методология исследования профессионального и семейного опыта космонавтов.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 23–27.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-23-27

Становление специалистов в области пилотируемых космических программ требует не только постоянного профессионального совершенствования, но и полной самоотдачи. Полетная деятельность

связана с высокими рисками и социальной ответственностью, требует от космонавтов адаптивности, эффективных стратегий самоконтроля и совладания с трудными ситуациями. В этой связи встает вопрос об уникальной структуре мировоззрения и восприятия жизненных ситуаций во всем их многообразии – о жизненных ценностях и структуре автобиографического опыта, определяющих самосознание и эффективность личности.

Актуальность исследования автобиографических представлений космонавтов обусловлена уникальностью профессии: это и характерная система ценностей, и особые стратегии совладания с негативным опытом и др. В недавних исследованиях было показано, что космонавтам присущ своеобразный набор ценностей и идеалов, определяющих их межличностные отношения [1–5]. Функционирование Международной космической станции (МКС) требует взаимодействия как на орбите, так и на Земле, людей различных национальных, организационных, религиозных и других культур, что невозможно без формирования единой профессиональной культуры космонавтов и астронавтов [6]. Разделяемые членами международного космического экипажа идеалы, ценности, нормы и установки становятся частью этой культуры, определяют их социальное поведение и взаимодействие. Мультикультурный состав современных и перспективных космических экипажей определяет внимание к изучению содержания ценностей как субъективных факторов, значимых для функционирования группы и определяющих степень ее сплоченности.

Космонавт является не только частью профессионального сообщества, он включен и в другие межличностные отношения, в частности семейные. При этом его становление как специалиста, его профессиональная «линия жизни» – один из важнейших факторов самосознания и личностного развития человека – вызывают определенные проблемы в семейной сфере самореализации, что также характерно

для представителей целого ряда «экстремальных» профессий [8]. По данным авторов, карьера космонавта-испытателя буквально «врывается» в течение семейных отношений. Длительные периоды обучения в отрыве от родных, постоянные испытания и эксперименты, опасность космических миссий, а также особые профессиональные ценности и установки, осознание своеобразия своего профессионального пути и переживание уникальности карьеры становятся источником конфликтов – как межличностных, так и внутренних. Эти конфликты часто решаются через подчинение интересов семьи профессиональным интересам специалиста. Противоречие между необходимостью поддержки семьи и условиями, диктующими длительное пребывание вдали от близких, составляют особенность социальных условий, в которых находится космонавт [8]. Вся острота этого автобиографического конфликта драматично раскрывается в формирующейся стратегии совладания с жизненными трудностями, когда ориентация на решение проблем начинает превалировать над ценностью эмоционального опыта и переживания [4].

Предметом нашего исследования является автобиографическая память – психологический феномен, объединяющий воспоминания о событиях индивидуальной жизни, актуальное самоощущение, а также видение перспектив и планы на будущее. То, что именно помним мы о себе, как оцениваем события, каков их «эмоциональный градус», к чему стремимся и чего хотим, – это глубоко личные, индивидуальные параметры памяти. Автобиографическая память может пониматься как центральный момент, «ядро» самосознания человека [9, 10].

Автобиографический рассказ о себе может оказаться информативным для психолога как проекция самоотношения, самосознания человека, особенностей его социальной сферы, жизненных перспектив, т.е. комплексных показателей психологического благополучия. Одной из методологических проблем при этом является то, что сама профессия имеет определенную «ауру» публичности, обладает уникальным статусом в структуре отечественного менталитета. В советское время каждого космонавта народ знал в лицо, это были национальные герои, публичные люди. И сейчас про каждого «космического специалиста» заинтересованный обыватель может найти информацию на официальных сайтах. Для контраста – тысячи «безымянных» врачей, учителей, продавцов. То есть профессия космонавта была и остается «штучной». Такое социальное положение специалиста подразумевает активное внедрение в личное пространство человека (в том числе и с исследовательскими целями). К «профессиональным деформациям» космонавтов можно отнести постоянную готовность к предоставлению информации о своем состоянии, мониторингу физиологического и психологического статуса.

Космонавты часто оказываются вынуждены рассказывать о себе. Это и прохождение многочисленных медицинских, биологических, физиологических, психологических обследований, самоотчеты, заполнение многочисленных анкет и опросников, участие в пресс-релизах, выступления на публике, интервью. Получается, что каждый космонавт вынужден всегда быть готовым к рассказу о своем жизненном пути – в масштабе от «как я стал космонавтом» до оценки актуального физиологического статуса «здесь и сейчас». Кроме того, близкое окружение специалиста также становится интересным публике, и сфера личного, интимного общения переходит в статус более широкой и открытой публичной сферы. При этом данная специфика профессии приводит к формированию психологической защиты, которая позволила бы космонавту сохранять устойчивое самоотношение и образ «Я» вне зависимости от постоянной готовности к самопрезентации. Одним из способов такой защиты может выступать некий стандартный рассказ, в котором автобиографические факты сложились в историю. Причем степень интимности этих фактов может быть абсолютно различной – от поверхностных данных «родился-учился-женился» до каких-то личных воспоминаний, переживаний, например, о неудаче или достижениях. Такой «безопасный» рассказ – то, что можно рассказать о себе без ущерба для внутреннего мира, образа «Я». Подобная презентация всех этих фактов достаточно безболезненна и проста для рассказчика, она не затрагивает действительно глубоких, личностно значимых воспоминаний.

Еще один из факторов, влияющих на жизненный путь космонавтов, – довольно растянутое во времени «вступление» в профессию. К подавляющему большинству видов деятельности человек готовится достаточно планомерно – детские мечты, специальное образование, квалификационные работы по профессиональной тематике, участие в практической работе и первый опыт в рамках обучения. Заветная мечта «полететь в космос» может потребовать гигантской самоотдачи и постоянной подготовки, но так и не воплотиться в жизнь. Многочисленные комиссии, строгие критерии отбора по линии специальности и здоровья, успешность прохождения подготовки – все это этапы прохождения в ряды космонавтов. А ведь есть еще и непредвиденные обстоятельства: сложные семейные ситуации, травмы, проблемы со здоровьем, – которые могут перечеркнуть карьеру космонавта уже после прохождения всех этапов отбора и подготовки. Преодоление такого полного проблем, падений и взлетов, профессионального пути к жизненной цели не только уникально, но и связано с формированием целого комплекса стратегий преодоления. Тем ценнее представляется этот уникальный опыт тем, кому все же посчастливилось состояться в профессии так, как мечталось.

В автобиографическом рассказе космонавта в рамках интервью, публикации мемуаров или медицинского и психологического обследования чаще всего акцентирована именно профессиональная сфера. Профессия является фундаментальным биографическим ядром, определяющим самосознание взрослого человека. Именно карьера, опыт трудовой деятельности у взрослого человека становятся тем полем, на котором удаchi, провалы, трудности и их разрешение формируют самооценку и самоотношение человека. Во многом профессия – это способ самоидентификации. Карьера и профессия действительно значимая область для любого взрослого человека. Эта тема богата на конкретные события, рассказ может быть достаточно подробным – и фактологически, и хронологически. Соответственно специфика космонавта как респондента – это акцент на полетной деятельности как на основной теме рассказа о себе. В то же время за перечислением ярких фактов профессионального становления достаточно легко укрыть глубинные переживания, свое отношение к этим событиям. Кроме того, перечислив многочисленные перипетии карьерного пути, можно свести к минимуму упоминания более частных, личных событий, т.е. скрыть значимую часть автобиографического опыта за фасадом бурной и наполненной событиями карьеры.

По значимости в формировании личности и ее ценностей с профессией можно сравнить только опыт семейных взаимоотношений. Как отмечает космонавт Ю.В. Усачев, семейные события, о которых узнает космонавт во время полета, обладают такой же значимостью, как и каждодневные события на борту. Происходящее с близкими не только важно космонавту, но и является его актуальным переживанием, причем в такой степени, что эти события вносятся в личный дневник наряду с рутинными событиями экипажа [11]. Семья и работа – это те самые парадигмы, общие для любого взрослого человека сферы жизни, которые определяют его отношение к себе и самопрезентацию. В связи с этим фокусом нашего исследования автобиографических представлений космонавта была взаимосвязь двух максимально значимых для взрослого человека жизненных линий – профессиональной и семейной. Именно эти линии нагружены основными событиями жизни, которые можно назвать вехами индивидуального развития и становления.

Данные сферы, рабочая и семейная, особо тесно переплетаются в космическом полете (КП). Работа члена экипажа всегда связана с длительной разлукой с семьей без возможности полноценной «земной» коммуникации. При этом члены семьи космонавта и его близкие друзья могут, наряду с сотрудниками Центра управления полетами (ЦУП) и группой специалистов, в ходе экспедиции периодически общаться с экипажем. Такое общение необходимо,

но оно все равно полностью не компенсирует потребность космонавта быть рядом с родными в трудный момент, принять активное участие в важных семейных событиях. Во время полета космонавтам не сообщают неприятные известия, значит, и о семье они не все знают. Может ли это не внушать волнения, опасения за родных, которые так далеко? Опыт изучения общения экипажа с Землей в ходе полета подтверждают нашу гипотезу о том, что профессия и семья не просто крайне значимые сферы, но и во многом конфликтующие стороны жизни [8].

Исходя из этого многообразия имеющихся фактов, методических и психологических стереотипов, весьма важным становится вопрос о разработке методологических и методических принципов исследования автобиографического опыта космонавтов.

«Транспектива»

Использовался оригинальный вариант проективной методики [12, 14]. Она позволяет выявлять восприятие обследуемым жизненного пути, его отношение к индивидуальному прошлому, настоящему и будущему, нарушение связей между этими жизненными периодами. Космонавту предлагалось пофантазировать и предположить, какая из 3 предложенных геометрических фигур (круг, квадрат, треугольник) символизирует его прошлое, настоящее и будущее. Далее все 3 фигуры размещаются на поле, состоящем из 9 ячеек (3 x 3). Полученные данные позволяют определить:

- жизненный период (прошлое, настоящее или будущее), который воспринимается обследуемым как ведущий, определяющий для автобиографии в целом;
- жизненный период (прошлое, настоящее или будущее), который является для космонавта наиболее привлекательным;
- нарушение связи между различными временными периодами (прошлым, настоящим и будущим).

«Жизненные события»

Использовался модифицированный под задачи конкретного исследования вариант, основанный на оригинальных методиках «Линия жизни» [9] и «Каузометрия» [15]. Это позволяет выявлять отношение космонавта к индивидуальному прошлому и жизненным перспективам, преобладающие сферы событий, которые являются образующими автобиографической памяти и самосознания.

Обследуемому предлагался лист с горизонтальной линией, заканчивающейся стрелкой («линия жизни»). На этой линии надо отметить точку «сегодняшний день». Далее составляется список из 5 самых главных событий жизни, потом добавляется еще 10 событий. Все события датируются и наносятся на линию так, что удаленность точки события от линии обозначает

его субъективную значимость (чем выше над линией, тем выше позитивная значимость события; чем ниже под линией, тем выше негативная значимость события). Все события просто называются, но не раскрываются участником исследования подробно. После датирования и нанесения событий на линию проводится опрос, в котором устанавливаются причинно-следственные и целевые связи между всеми событиями. На основе этих событий строится матрица, позволяющая подсчитать, сколько связей приходится на каждое событие (объективная значимость, т.е. степень включенности события в жизненный путь специалиста). Анализ матрицы позволяет выявить:

- насыщенность прошлого и будущего событиями: количество упоминаемых событий в каждом временном периоде. Этот параметр отражает значимость каждого периода в автобиографии. Было введено ограничение в 15 событий, но оно часто нарушалось обследуемыми;

- наличие или отсутствие видения жизненных перспектив, т.е. упоминает ли участник исследования события будущего, хочет/может ли он представить свои перспективы и планы;

- субъективную значимость каждого события, то, как космонавт оценивает значение каждого события в автобиографии. Графически эта значимость обозначается удалением точки события от хронологической оси;

- объективную значимость каждого события – это его включенность в автобиографию и связь с остальными событиями. Чем больше причинно-следственных и целевых связей события с другими, тем выше его включенность в структуру автобиографии и, следовательно, объективная значимость.

- количество связей между событиями. Этот параметр отражает взаимосвязи между событиями разных жизненных сфер, показывает, насколько переплетены или изолированы профессиональная и семейная линия, а также конкретные виды деятельности в рамках каждой линии (например, можно оценить связи между событиями, относящимися к работе в экипаже, и остальными событиями профессиональной деятельности);

- периоды «уплотнения событий» – наличие на линии скоплений хронологически близких событий, которые образуют блоки, конгломераты, или «уплотнения». Как показали исследования [13], переломные события на линии жизни часто сопровождаются такими «уплотнениями». Кризисный момент, момент коренных изменений в течение жизни часто обозначается обследуемыми в виде целой череды событий, хронологически близких, причем эти события могут относиться к одной и той же сфере жизни (семья, работа, учеба, социальные изменения и т.д.) либо к разным.

- сферы значимых жизненных событий (автобиографии), их особенности и взаимосвязи, а также

общая интегрированность различных сфер жизни в структуру автобиографии.

«Альтернативные пути»

Использовалась авторская модификация оригинальной методики [12, 14]. Методика позволяет выявлять возможные для обследуемого альтернативные пути автобиографии, возможные жизненные выборы. Из составленного космонавтами списка событий выбирались 3 максимально значимых и наносились на бланк с такой же горизонтальной линией-стрелкой («линия жизни»). Участнику исследования предлагалось представить, что могло бы произойти в его жизни, если бы этих событий не было вообще. Желательно назвать по 3 альтернативы на каждое событие. Данная методика позволяет выявить:

- ригидность / лабильность в восприятии автобиографии, видении жизненного пути;

- сводимость / несводимость альтернативных жизненных событий к итогам свершившихся событий;

- альтернативные жизненные достижения, события, которые могли бы произойти.

Выводы

1. Представленный диагностический набор исследования автобиографического опыта космонавтов позволяет в достаточно свободной и неформальной обстановке провести беседу с космонавтами – людьми, чья жизнь наполнена уникальными «неземными» событиями. В рамках такой полуструктурированной беседы, когда собеседник уверен, что психолог не намерен «копаться» в его личной жизни, получается сохранять баланс доверительного общения и психологического обследования.

2. Такой подход дает возможность впервые получить более полный, чем в проводимых ранее исследованиях американских астронавтов и российских космонавтов, доступ к ценной автобиографической информации. Полученные данные позволяют описать ряд особенностей переплетения двух важных линий автобиографии космонавтов – семейной и профессиональной.

Исследование выполнено при поддержке гранта Канадского космического агентства № 027SR. 9F007-052251 и темы РАН № 63.2.

Список литературы

1. Kanas N., Manzey D. Space psychology and psychiatry. 2nd ed. Springer and Microcosm Press, CA, 2008.
2. Sandal G.M., Bye H.H., van de Vijver F.J.R. Personal values and crew compatibility: results from a 105 days simulated space mission // Acta Astronaut. 2011. V. 69. P. 141–149.

3. Stuster J. Behavioral issues associated with long duration space expeditions: review and analysis of astronaut journals. Final Report to NASA (July 2010).

4. Suedfeld P., Brcic J., Johnson Ph.J., Gushin V. Coping strategies during and after spaceflight: data from retired cosmonauts // *Acta Astronaut.* 2015. V. 110. P. 43–49.

5. Виноходова А.Г., Гушин В.И., Юсупова А.К. и др. Ретроспективный анализ межличностного восприятия и ценностей опытных космонавтов-участников международных полетов на орбитальных станциях «Мир» и МКС // *Авиакосм. и экол. мед.* 2017. Т. 51. № 5. С. 22–30.

Vinokhodova A.G., Gushchin V.I., Yusupova A.K. et al. Retrospective analysis of interpersonal perception and values of experienced cosmonauts-members of multinational missions to the orbital stations «Mir» and the ISS // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2017. V. 51. № 5. P. 22–30.

6. 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.

7. Suedfeld P. Space memoir: Value hierarchies before and after mission – a pilot study // *Ibid.* 2006. V. 58. P. 583–586.

8. Johnson Ph. J., Asmaro D., Suedfeld P., Gushin V. Thematic content analysis of work – family interactions: retired cosmonauts' reflections // *Ibid.* 2012. V. 81. P. 306–317.

9. Нуркова В.В. Свершенное продолжается: психология автобиографической памяти личности. М., 2000.

Nourkova V.V. The accomplished continues: psychology of autobiographical memory of personality. Moscow, 2000.

10. Нуркова В.В. Автобиографическая память как проблема психологического исследования // *Психол. журнал.* 1996. Т. 17. № 2. С. 16–29.

Nourkova V.V. Autobiographical memory as a psychological problem // *Psikhologicheskii zhurnal.* 1996. V. 17. № 2. P. 16–29.

11. Усачёв Ю.В. Дневник космонавта. Три жизни в космосе. М., 2004.

Usachev Yu.V. The cosmonaut's diary. Three lives in space. Moscow, 2004.

12. Нуркова В.В., Василевская К.Н. Автобиографическая память в трудной жизненной ситуации // *Вопросы психологии.* 2003. № 5. С. 93–102.

Nurkova V.V., Vasilevskaya K.N. Autobiographical memory in a difficult life situation: new phenomena // *Voprosy psikhologii.* 2003. № 5. P. 93–102.

13. Нуркова В.В., Митина О.В., Янченко Е.В. Автобиографическая память: «сгущения» в субъективной картине прошлого // *Психол. журнал.* 2005. Т. 26. № 2. С. 22–33.

Nourkova V.V., Mitina O.V., Yanchenko E.V. Autobiographical memory: «the clumps» in the subjective representation of the past // *Psikhologicheskii zhurnal.* 2005. V. 26. № 2. P. 22–33.

14. Нуркова В.В. Созидание прошлого. К вопросу о потенциале автобиографической мнемотерапии // *Консультативная психология и психотерапия.* 2005. № 1. С. 73–89.

Nourkova V.V. The creation of the past. To the question of the autobiographical mnemotherapy capability // *Konsultativnaya psikhologia i psikhoterapiya.* 2005. № 1. P. 73–89.

15. Кроник А.А., Ахмеров Р.А. Каузометрия. Методы самопознания, психодиагностики и психотерапии в психологии жизненного пути. М., 2008.

Kronik A.A., Akhmerov R.A. Causometry. A method of self-knowledge, psychodiagnosis and psychotherapy in life-way psychology. Moscow, 2008.

Поступила 15.05.2018

METHODICAL APPROACH TO THE STUDIES OF COSMONAUTS' PRESENTATION OF AUTOBIOGRAPHIES

Gushchin V.I., Kuvshinova O.L., Shalina O.S., Vinokhodova A.G., Suedfeld P., Johnson Ph.J.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 23–27

The article deals with methodology of studying cosmonauts' modes of narrating autobiography. Life story may contain information that can be interpreted by psychologist as a projection of such indicators of psychological well-being as self-attitude, self-consciousness, social behavior and life chances. In this context, it is alluring to study life experience of not just fulfilled people but accomplished professionals who live the lives guided by occupations that require to put their hearts in. Studies of autobiography presentations of cosmonauts is complicated by insufficiency of methods, large experience of cosmonauts in going through different kinds of psychological testing, and the need to apply high quality methods that will be accepted by these people and ensure valid and significant results for investigators. The autobiography experience of a cosmonaut is often ambiguous, intricate and full of both social and personal conflicts, conflict between family and professional values being the central one. The article describes several approaches to autobiography studies and author modifications tried out in the Canadian-Russian project titled «The past, experience and space flight effects: Lessons of experienced cosmonauts» with participation of 20 cosmonauts flown on 1 to 5 missions to orbital station «Mir» and ISS.

Key words: space flight, autobiography, values, methodology of studying the cosmonaut's professional and family experience.

УДК 612.821

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗИСТИВНЫХ УПРАЖНЕНИЙ ДЛЯ КОСТНОЙ СИСТЕМЫ КОСМОНАВТОВ В МНОГОКРАТНЫХ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ

Кукоба Т.Б.^{1, 2, 3}, Новиков В.Е.¹, Бабич Д.Р.¹, Лысова Н.Ю.¹, Гордиенко К.В.¹, Фомина Е.В.^{1, 2, 3}

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

²Московский педагогический государственный университет

³Российский университет дружбы народов, Москва

E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

Целью исследования явилась оценка эффективности физических тренировок с использованием бортовых эспандеров и силового тренажера для профилактики изменений минеральной плотности костной ткани (МПК) в длительных космических полетах (КП). Проводились обследования одной и той же группы космонавтов в 2 разных полетах на Международной космической станции.

Резистивные тренировки с эспандерами и на тренажере выполнялись согласно рекомендациям российских специалистов, т.е. через день. Тренировки на бегущей дорожке и велоэргометре, выполненные космонавтами во время обоих полетов, по параметрам нагрузки значительно не различались. Профилактическую эффективность применения резистивных упражнений оценивали по результатам обследования на костном денситометре Hologic Delphy. До и после КП измеряли МПК в поясничных позвонках (L_1-L_4), шейке бедра и области большого вертела. Установлено, что тренировки с использованием силового тренажера значительно эффективнее тренировок с использованием эспандеров в профилактике снижения МПК в длительных КП. В ходе подготовки к межпланетным миссиям представляется важным результат, свидетельствующий о возможности снижения МПК в нижних сегментах скелета при длительном пребывании в условиях невесомости в случае выполнения резистивных упражнений на силовом тренажере через день.

Ключевые слова: резистивные упражнения, силовой тренажер, эспандеры, микрогравитация, минеральная плотность кости.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 28–33.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-28-33

Разработка эффективных средств профилактики неблагоприятных изменений в скелетно-мышечной системе является неотъемлемым условием обоснования возможности межпланетных полетов. Нарушение минерального обмена костной ткани является одной из важнейших проблем пребывания человека в условиях длительного КП [1, 2]. Показан градиент изменений в костной системе,

проявляющийся в снижении минеральной плотности костной ткани (МПК) в трабекулярных структурах нижней половины скелета [3, 4] и увеличении в костях верхней половины скелета. Этот феномен рассматривается как вторичный и является следствием перераспределения жидких сред в краиниальном направлении в условиях невесомости. Снижение МПК в поясничных позвонках, костях таза и бедренной кости обусловлено функциональной адаптацией костной ткани к меняющейся механической нагрузке [5], соответственно одним из способов противодействия этому процессу может являться повышение механической нагрузки на опорно-двигательный аппарат, в том числе с помощью резистивных тренировок. До 19-й экспедиции на Международной космической станции (МКС) для выполнения резистивных упражнений все космонавты использовали эспандеры. В настоящее время российские космонавты имеют возможность выполнять тренировки на силовом тренажере. В тренажере используются вакуумные цилиндры, имитирующие нагрузку со «свободными» весами [6]. При этом некоторые члены экипажей МКС для сохранения силы мышц используют эспандеры. В этой связи возник вопрос о сравнительном анализе профилактической эффективности этих средств в изменении минеральной плотности костной ткани в длительных КП. Обычно в исследованиях оценивается эффективность средств на основе анализа тренировок, выполняющихся в разных миссиях и разными космонавтами [7–11]. Мы посчитали интересным сопоставить воздействие разных средств на костную ткань одних и тех же космонавтов, т.е. использовали данные космонавтов, совершивших 2 полета с применением разных средств профилактики в ходе КП. В этом случае снимается ограничение, обусловленное индивидуальными особенностями метаболизма костной ткани. Так, например, высокие потери костной массы связаны с определенными аллельными вариантами того или иного генотипа, показано, что пониженная плотность костной

ткани и риск переломов, обусловленных остеопорозом, связаны с полиморфизмом сайта связывания Sp1 в гене *COL1A1* [12] и RUNX2 гена SNPs [13].

Цель данного исследования – сравнительный анализ профилактической эффективности физических тренировок с использованием бортовых эспандеров и силового тренажера в изменении МПК при использовании этих 2 средств одной и той же группой космонавтов в разных полетах на МКС.

Методика

В исследовании приняли участие 5 космонавтов, выполнивших несколько длительных КП на МКС. Проведен сравнительный анализ величин МПК в группе космонавтов, применявших в одном из полетов бортовые эспандеры и резиновые ленты, в другом полете – силовые упражнения с использованием силового тренажера. Это позволило рассмотреть не только среднegrupповые, но и впервые – индивидуальные показатели одних и тех же космонавтов, в 2 полетах применявших разные средства профилактики.

Комплект эспандеров, применяемый космонавтами, состоит из «короткого» – для выполнения упражнений, нагружающих мышцы плечевого пояса, «среднего» – оказывающего нагрузку на мышцы туловища, и «длинного» – для мышц туловища и ног. При растяжении рабочей части до максимальной длины «короткий эспандер» обеспечивает усилие не более 18 кгс, «средний» – не более 22 кгс и «длинный» – не более 25 кгс.

В ходе полета с использованием тренажера ARED (advanced resistive exercise device), обеспечивающего нагружение до 272 кг, «средний» по обследованной группе «вес отягощения» за тренировку составил 115 ± 33 кг в упражнениях «приседания», 134 ± 45 кг – в «подъемах на носки», 86 ± 60 кг – в «становой тяге». В работе проанализированы данные на основе самоотчетов космонавтов.

По рекомендациям российских специалистов в обоих полетах силовые тренировки как с эспандерами, так и на тренажере выполняли через день. Локомоторные и велоэргометрические тренировки космонавты выполняли в соответствии с протоколами бортовой документации [4], в обоих полетах по аналогичным программам и с одинаковыми индивидуальными предпочтениями.

Исследование МПК проводили на серийном клиническом костном денситометре Hologic Delphy [5]. Предполетное обследование выполнено не более чем за 60 сут до полета, послеполетное – в интервале от 7 до 14 сут после посадки. Измеряли проекционную МПК (г/см^2) в поясничных позвонках (L_1-L_4), шейке бедра и области большого вертела. Суммарная лучевая нагрузка составляла до 0,01 мЗв. Точность измерения составляла $\pm 0,5-1\%$.

Допустимые колебания значений калибровочного фантома 1,5 %.

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica 10 с использованием непараметрических методов описательной статистики. Критерий Вилкоксона использовался при сравнении показателей внутри группы, критерий Манна – Уитни – при сравнении между группами. Все испытуемые в соответствии с Хельсинкской декларацией подписали Информированное согласие на участие в эксперименте.

Результаты и обсуждение

Индивидуальные показатели одних и тех же космонавтов в 2 полетах с применением разных средств профилактики в ходе КП были исследованы впервые, в этой связи изменения МПК рассматривались в сопоставлении с индивидуальными особенностями в дозировке резистивных и локомоторных нагрузок.

Так, космонавт А при выполнении резистивных упражнений для мышц ног использовал «вес отягощения» 220–240 % от массы тела на Земле, выполняя при этом 3–4 подхода по 12–14 повторений. Тренировки выполнялись 2–3 раза в неделю, согласно рекомендациям специалистов. Локомоторные тренировки в обоих полетах выполнялись строго в соответствии с бортовой документацией. Анализ данных денситометрии показал, что у космонавта А потери в шейке бедра (рис. 1) и зоне большого вертела (рис. 2) оказались меньше после полета с применением ARED, а в поясничном отделе позвоночника (рис. 3) в этих 2 полетах значительно не различались.

Резистивные тренировки космонавта В не отличались от тренировок космонавта А, описанных выше. Локомоторные тренировки выполнялись в соответствии с бортовой документацией. При этом в обоих полетах у этого космонавта наблюдались максимальные из всей группы потери МПК в шейке бедра (см. рис. 1). В случае использования в полете тренажера потери в шейке бедра составили 6,6 % и оказались меньше, чем после КП с использованием

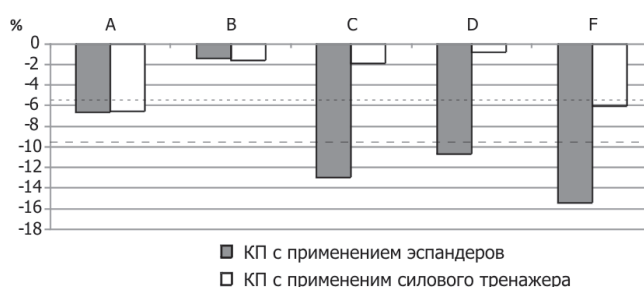


Рис. 1. Индивидуальные потери МПК в отделе позвоночника L_1-L_4 космонавтов после каждого полета

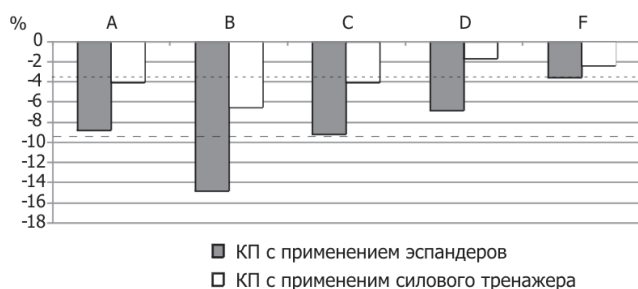


Рис. 2. Индивидуальные потери МПК в шейке бедра космонавтов после каждого полета

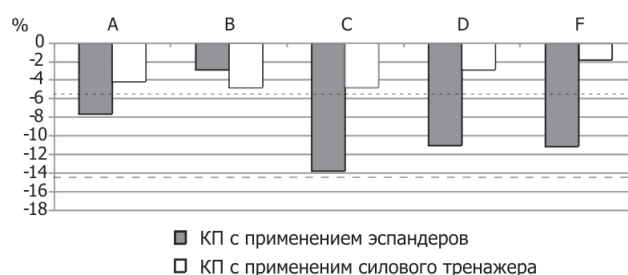


Рис. 3. Индивидуальные потери МПК в большом вертеле космонавтов после каждого полета

эспандеров, когда потери достигали 14,8 %. Потери в большом вертеле и поясничном отделе позвоночника у этого космонавта оказались наименьшими по группе после полета с использованием упражнений с эспандерами. После полета с использованием силовых упражнений на тренажере величина потерь в поясничном отделе позвоночника не изменилась, оставаясь наименьшей по группе и достигая 1,6 %, а в большом вертеле было отмечено некоторое увеличение потерь до 4,8 %, тогда как после полета с использованием эспандеров снижение МПК составляло 2,9 %. Этот случай, характеризующий индивидуальные особенности метаболизма костной ткани, может быть объяснен явлением зоноспецифичности, описанным ранее В.С. Огановым (2003). Явление зоноспецифичности – это индивидуальные особенности изменений в разных сегментах скелета у одного и того же космонавта после повторных полетов, фенотипически обусловленные особенностями метаболизма отдельных локусов скелета. Зоноспецифичность связывают с различиями в пространственной организации неколлагеновых белков и рассматривают как проявление «геномного полиморфизма», т.е. различий в генетической детерминированности индивидуальных величин костной массы и метаболизма костной ткани [1].

Космонавт С при выполнении резистивных упражнений на тренажере для мышц ног использовал «вес отягощения» 30–50 % от массы тела, выполняя при этом 3–4 подхода по 12–20 повторений, т.е. «вес отягощения» был меньше, чем у космонавтов А и В. Локомоторные тренировки в обоих полетах космонавт выполнял строго по бортовой документации. У этого космонавта после полета с использованием эспандеров наблюдались наибольшие по группе потери МПК в большом вертеле, достигавшие 13,8 % (см. рис. 2), и в поясничном отделе позвоночника (см. рис. 3), составлявшие 13,2 %, а после КП с применением силового тренажера потери оказались значительно меньше во всех изучаемых сегментах.

Космонавт D в резистивных упражнениях на тренажере для мышц ног использовал «вес отягощения»

около 100 % от массы тела на Земле, выполняя 3 подхода по 12–20 повторений через день в течение всего КП, следуя рекомендациям специалистов. В процессе локомоторных тренировок в обоих КП космонавт использовал личные протоколы тренировок, особенностью которых являлось отсутствие бега в пассивном режиме движения полотна беговой дорожки. В каждом тренировочном занятии на беговой дорожке космонавт использовал интервалы ходьбы, медленного, среднего и быстрого бега. Максимальная скорость бега не превышала 13 км/ч, при этом продолжительность бега с максимальной скоростью за тренировку составляла от 3 до 6 мин. У этого космонавта после полета с применением эспандеров потери МПК в шейке бедра составили 6,2 % (см. рис. 1), а в остальных изучаемых сегментах были близки к средним по группе (см. рис. 2, 3). После полета с использованием силового тренажера потери были значительно ниже и оказались наименьшими по группе в шейке бедра (2,1 %) и поясничном отделе позвоночника L_1-L_4 (0,8 %).

Космонавт F резистивные тренировки на тренажере выполнял 1–2 раза в неделю, используя при этом в упражнениях для мышц ног «вес отягощения» 100–120 % от массы тела, 3–4 подхода по 16–26 повторений. Рекомендации специалистов выполнял не в полной мере, в частности, космонавт самостоятельно снизил количество резистивных тренировок, выполнив за КП 70 % от запланированных занятий. Космонавт в обоих полетах при локомоторных тренировках выполнял 3 дня микроцикла в соответствии с протоколами бортовой документации. В 4-й день микроцикла выполнял тренировки в активном режиме полотна беговой дорожки по личному протоколу, в котором чередовались интервалы ходьбы со скоростью 5–6 км/ч, продолжительностью до 6 мин, с интервалами бега со скоростью 10–12 км/ч длительностью до 10 мин. У этого космонавта после полета с применением эспандеров были выявлены наибольшие по группе потери МПК в поясничном отделе позвоночника L_1-L_4 , которые достигали 15,4 %, а после полета, в котором использовался силовой тренажер, потери

Таблица

Изменение МПК в группе космонавтов, использовавшей разные средства профилактики в 2 КП ($\bar{X} \pm \sigma$)

Локализация	КП с эспандерами		% от фона	КП с силовым тренажером		% от фона
	До КП	После КП		До КП	После КП	
Большой вертел, г/см ²	0,78 ± 0,15	0,68 ± 0,14*	12,85	0,78 ± 0,03	0,77 ± 0,02#	3,31
Позвоночник (L ₁ -L ₄), г/см ²	1,08 ± 0,15	0,99 ± 0,14*	9,25	1,17 ± 0,32	1,11 ± 0,32#	4,92
Шейка бедра, г/см ²	0,87 ± 0,11	0,77 ± 0,05*	11,10	0,85 ± 0,07	0,82 ± 0,07#	3,10

Примечание. * – различия достоверны от фона при $p \leq 0,05$; # – различия достоверны в сравнении с КП с использованием эспандеров $p \leq 0,01$.

в этом сегменте скелета уменьшались до 6,1 % (см. рис. 3). Значительно уменьшились после КП с применением силового тренажера и потери МПК в большом вертеле (см. рис. 2).

Таким образом, анализ индивидуальных особенностей потерь МПК явно свидетельствует о проявлении зоноспецифичности, при этом прослеживается тенденция к снижению потерь в полете с использованием силового тренажера, что и подтвердилось при статистическом анализе потерь по группе.

Анализ данных денситометрии по группе показал, что МПК в исследованных отделах бедренной кости снижалась после обоих КП, но снижение МПК являлось статистически значимым только после полета с использованием эспандеров ($p \leq 0,05$). Снижение МПК при использовании в ходе КП тренажера для резистивной тренировки значимо не изменялось по сравнению с фоном. Важно отметить, что потери МПК при использовании силового тренажера оказались значимо меньшими ($p \leq 0,01$) при сравнении с потерями в КП с применением упражнений с эспандерами (таблица). Очевидно, это явилось следствием того, что суммарная механическая нагрузка на скелетно-мышечный аппарат при занятиях на силовом тренажере оказалась значительно больше, чем при выполнении упражнений с эспандерами, что и обеспечивало больший профилактический эффект.

Результаты нашего исследования, с одной стороны, согласуются с экспериментами, где выполнено сравнение потерь МПК после полетов с использованием ARED и iRED (interim resistive exercise device), где также показано преимущество тренировок с большей механической нагрузкой [6], которую обеспечивает ARED. С другой стороны, в отличие от рекомендаций партнеров по МКС [5], в российской системе профилактики резистивные тренировки выполняются не ежедневно, а через день, но при этом они оказались достаточно эффективными в сохранении МПК.

Наибольшее снижение МПК в среднем по группе отмечали в большом вертеле, что согласуется с представлениями о самой большой уязвимости этого сегмента скелета в условиях длительных

космических миссий [9–11]. В КП с применением эспандеров потери в большом вертеле были сопоставимы с величинами потерь, описанными другими авторами при использовании в КП этого средства профилактики на станции «Мир» (12 %) [5].

Менее выраженное снижение МПК после КП с использованием эспандеров выявили в шейке бедра, средние по группе потери МПК достигали 8,02 %. Полученные данные также близки к результатам исследований, где регистрировались потери в этом сегменте в случае применения эспандеров, – для станции «Мир» это 8,53 % [5].

Необходимо подчеркнуть, что МПК после КП длительностью от 5 до 7 мес в губчатых зонах кости нижней половины тела скелета снижается незначительно, оставаясь обычно в пределах нормы, что рассматривается как быстро развивающаяся, но обратимая остеопения, только в единичных случаях у космонавтов с исходно низкой МПК потери достигали 20 % [3]. Положительная динамика восстановления костной ткани наблюдается обычно после 2-го месяца восстановления [4], восстановление 50 % потерь МПК происходит в пределах 9 мес [3], а достижение предполетного уровня МПК может занять до 3 лет.

Ранее нами было показано, что резистивные тренировки, выполняемые в соответствии с рекомендациями российских специалистов через день, позволяют сохранить максимальную произвольную силу и силовую выносливость мышц после КП [14]. Данное исследование указывает на возможность сохранения достаточной МПК при выполнении физических тренировок в соответствии с российской системой профилактики, где ежедневно выполняются локомоторные тренировки в интервальном режиме, а резистивные чередуются через день с тренировками на велоэргометре. В перспективе, вероятно, необходимо рассмотреть возможность учета при отборе космонавтов индивидуальных особенностей метаболизма костной ткани, являющихся генетически предопределенными. Полученные нами данные можно использовать при разработке тренировочных программ резистивной тренировки для космонавтов межпланетных космических миссий.

PREVENTIVE EFFECTIVENESS OF RESISTIVE EXERCISES FOR THE BONE SYSTEM OF COSMONAUTS IN REPEATED LONG-DURATION SPACE MISSIONS

Kukoba T.B., Novikov V.E., Babich D.R., Lysova N.Yu., Gordienko K.V., Fomina E.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 28–33

Purpose of the investigation was to evaluate effectiveness of training with expanders and strength training equipment against changes in bone mineral density (BMD) during long-term space missions. The same group of cosmonauts was tested in 2 different the International space station missions.

Resistive exercises with the expanders and on training equipment were done every other day as was recommended by Russian coaches. Settings of the treadmill and veloergometer programs did not differ much in the missions. Preventive effectiveness of resistive exercises was judged by the results of pre- and post-mission densitometry (Hologic Delphy) of the lumbar vertebrae (L₁–L₄), femoral neck and greater trochanter. It was shown that use of strength training equipment is explicitly more effective in BMD loss prevention than expanders. In light of projected exploration missions this result leads to the supposition that mineral density in the lower part of the skeleton could be kept under control despite prolonged exposure in microgravity by daily resistive exercises on strength developing equipment.

Key words: resistive exercises, weightlifting training equipment, expanders, microgravity, bone mineral density.

УДК 612.085.4

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АУТОПРОБИОТИКОВ НА ОСНОВЕ ЭНТЕРОКОККОВ И ЛАКТОБАЦИЛЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И В УСЛОВИЯХ «СУХОЙ» ИММЕРСИИ

Усанова Н.А., Морозова Ю.А., Носовский А.М., Ильин В.К.

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

E-mail: usanovasp@mail.ru

*Проанализированы результаты применения аутопробиотиков на основе культур *Enterococcus faecium* и *Lactobacillus* sp., выделенных от операторов в эксперименте «Марс-500» и в условиях «сухой» иммерсии. Вследствие приема препаратов выявлено отсутствие количественного роста условно-патогенных микроорганизмов в период острой адаптации в герметично замкнутом объекте в эксперименте «Марс-500». Применение кисломолочного продукта, обогащенного аутологичными штаммами лактобацилл, употребляемого испытателями в условиях «сухой» иммерсии, привело к количественному росту протективной микрофлоры кишечника, представленной лактобациллами и бифидобактериями.*

Ключевые слова: пробиотики, аутопробиотики, аутологичные штаммы, герметично замкнутый объект, протективная микрофлора.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 34–38.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-34-38

Известно, что длительная изоляция ведет к развитию дисбактериозов, вызванных увеличением доли условно-патогенных микроорганизмов в составе микрофлоры покровных тканей, слизистых оболочек и кишечника, что ведет к перекрестному инфицированию и спонтанному формированию штаммов с признаками госпитализма [1]. Известен риск развития ауто- и перекрестных инфекций, существующий в период длительной изоляции, в особенности в так называемый период острой адаптации (первые 10–15 сут изоляции), описанный в работах [2, 3]. В этом случае необходимо принимать профилактические меры, в том числе с использованием препаратов пробиотической и даже аутопробиотической группы.

Цель работы: изучение влияния аутопробиотиков на микробиоценоз кишечника, покровных тканей и слизистых оболочек операторов в условиях герметично замкнутого объекта.

Энтерококки представляют собой условно-патогенные микроорганизмы, их высокая антагонистическая активность по отношению к ряду патогенных микроорганизмов является основанием к применению бактерий этого рода в качестве

производственных штаммов биопрепаратов (про- и синбиотиков), а также для биотехнологических целей в пищевой промышленности.

К свойствам энтерококков относят высокий уровень устойчивости к факторам внешней среды (температуре, pH); стимуляция роста представителей индигенной «дружественной» флоры в результате продукции витаминов и других ростостимулирующих факторов; нормализация pH; нейтрализация токсинов [4]; нахождение практически во всех отделах кишечника и других биотопах, участие в синтезе витаминов, метаболизме сахаров (лактозы); иммуностимуляция – поддержка уровня цитокинов широкого спектра; высокая антагонистическая активность (стафилококки, листерии, кишечные палочки) – продукция энтероцинов (повреждение клеточной стенки с последующей гибелью клетки); противовоспалительные свойства [5].

Направления применения энтерококков самые различные. Это лечение антибиотикоассоциированной диареи; снижение продолжительности острой диареи; гипохолестеринемический эффект; улучшение некоторых биохимических показателей; лечение синдрома раздраженной кишки; использование в виде закваски к сыру чеддер; эффективность лечения хронического тонзиллита, хронического бронхита, острого энтерита; элиминация патогенных штаммов *Helicobacter pylori*; антагонистический эффект; противоопухолевая активность.

Интенсивность и широта терапевтического эффекта микробиологических препаратов из энтерококков существенно более выражены, чем при использовании бифидо- и лактобактерий. Они охватывают все компоненты клеточного и гуморального иммунитета. Соответственно увеличивается и спектр показаний к терапии, который охватывает не только патологии пищеварительного тракта [6].

Лечебное действие лактобацилл обусловлено действием их продуктов жизнедеятельности. Молочнокислые бактерии, представителями которых являются лактобациллы, обладают протеолитической активностью за счет действия вырабатываемых протеаз, протеиназ, пептидаз, липолитической

активностью, расщепляют жир молока и некоторые триглицериды. Антагонистическое действие лактобацилл обусловлено высокой кислотообразующей активностью, продуцированием антибиотических веществ, перекиси водорода, лизоцима. Поскольку продуцирование антибиотических веществ большинством штаммов лактобацилл незначительно, образование ими большого количества молочной и уксусной кислоты из углеводов приводит к снижению pH среды и угнетению роста чувствительных к изменению pH патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. О роли продуцируемой перекиси водорода в антагонизме лактобацилл опубликованы противоречивые данные, существующая теория объясняет механизм действия тем, что образующаяся в процессе роста лактобацилл перекись водорода ингибирует рост каталазоположительных микроорганизмов [4].

Накоплены многочисленные данные, подтверждающие, что систематическое употребление простокваши, ряженки, кефира и других хорошо известных кисломолочных продуктов способствует нормализации кишечной микрофлоры, угнетает рост потенциально патогенных микроорганизмов, стимулирует иммунный ответ, нормализует моторику кишечника, увеличивает усвояемость молочного белка и лактозы, снижает риск возникновения злокачественных новообразований пищеварительного тракта и грудной железы [4].

Методика

Эксперимент «Марс-500»

Для профилактики дисбактериоза у 6 операторов (мужчин в возрасте 33 ± 6 лет) в условиях эксперимента «Марс-500» был применен препарат, созданный на основе аутоштаммов энтерококков. Для коррекции дисбактериоза кишечника применялись угольные таблетки, насыщенные культурами *Enterococcus faecium* в количестве 10^8 КОЕ.

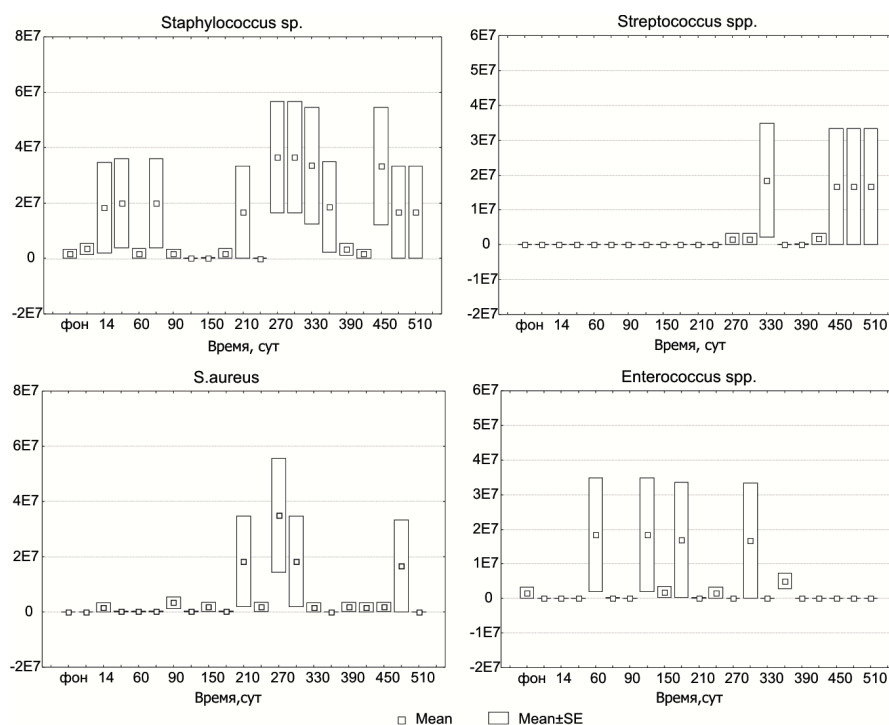


Рис. 1. Динамика изменений микрофлоры слизистых носовых пазух в эксперименте «Марс-500»

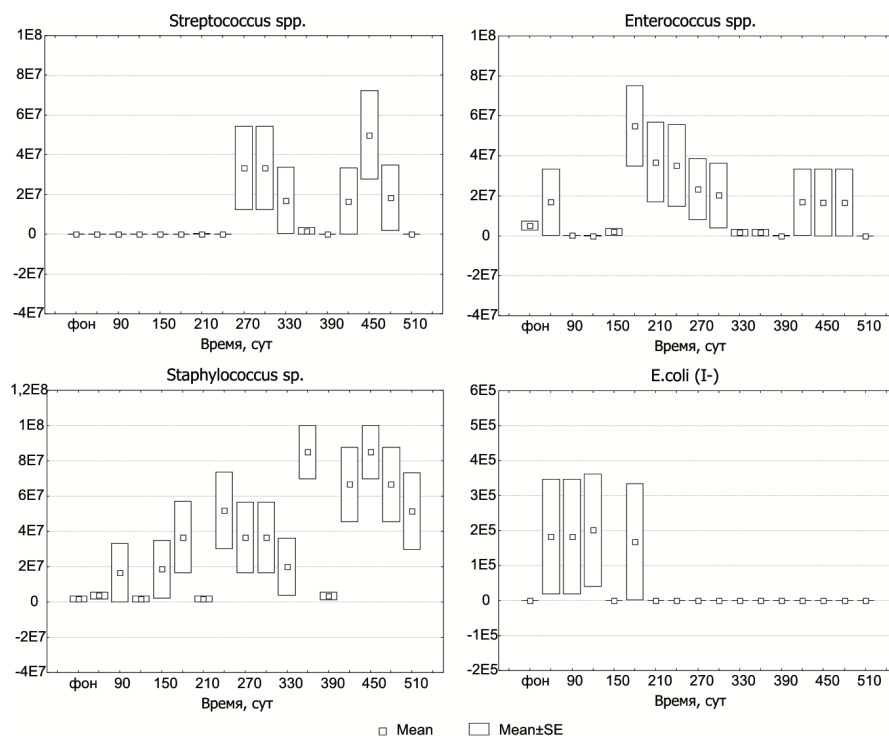


Рис. 2. Динамика изменений микрофлоры влажосодержащих участков кожи в эксперименте «Марс-500»

Аутоштаммы *E. faecium* были выделены из состава микрофлоры кишечника испытуемых за 1 мес до начала эксперимента (рис. 1). Препараты применялись

в течение первых 30 сут эксперимента по 1 таблетке 2 раза в день с приемом пищи. При использовании препаратов на основе аутологических препаратов на основе *E. faecium* удалось избежать количественного роста условно-патогенных микроорганизмов в период острой адаптации в течение первых нескольких недель эксперимента. Микрофлора кишечника в течение периода приема препарата отличалась стабильностью и достаточно высокими показателями облигатной микрофлоры – бифидобактерий, лактобацилл, непатогенных энтерококков.

Эксперимент «сухая» иммерсия

В эксперименте, который проводился по принятой методике, участвовали 12 человек – мужчины в возрасте 21–43 лет. Длительность пребывания в иммерсионной ванне – 1 сут и 7 сут. Контрольная группа состояла из 6 человек, по возрасту сопоставимых с экспериментальной группой. Для профилактики дисбактериоза лица экспериментальной и контрольной группы принимали препараты-аутопробиотики на основе лактобацилл. Микроорганизмы выделялись из кишечника обследуемых, тестировались на отсутствие генов патогенности. Нарбатывалась биомасса препарата, которая асептически смывалась физраствором. Полученный препарат добавляли в готовый кефир 3,2 % жирности таким образом, чтобы конечная концентрация микроорганизмов, входящих в состав аутопробиотиков в кефире, составила 1×10^8 КОЕ/мл. Полученный кисломолочный продукт обследуемый выпивал ежедневно в объеме 250 мл в течение всего эксперимента.

Результаты и обсуждение

В эксперименте «Марс-500» у обследуемых лиц практически по каждой определяемой группе микроорганизмов отмечали положительные тенденции

не только в период приема препарата (первые 30 сут эксперимента), но и в последующие сроки проведения эксперимента, что свидетельствовало о продолжительном потенцированном действии принимаемых препаратов. Так, на слизистых полости

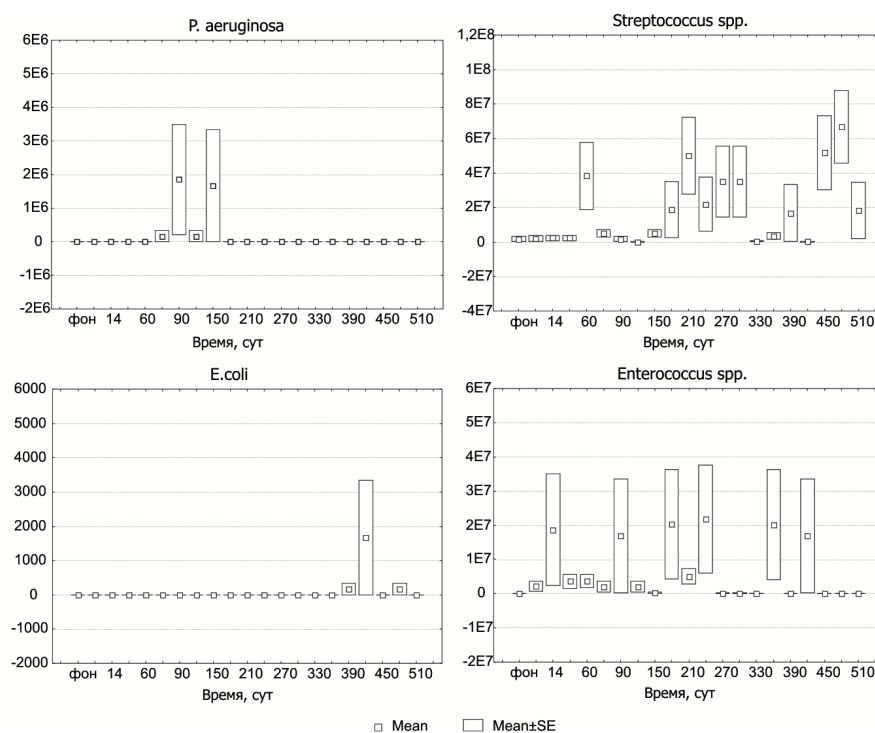


Рис. 3. Динамика изменений микрофлоры ротоглотки в эксперименте «Марс-500»

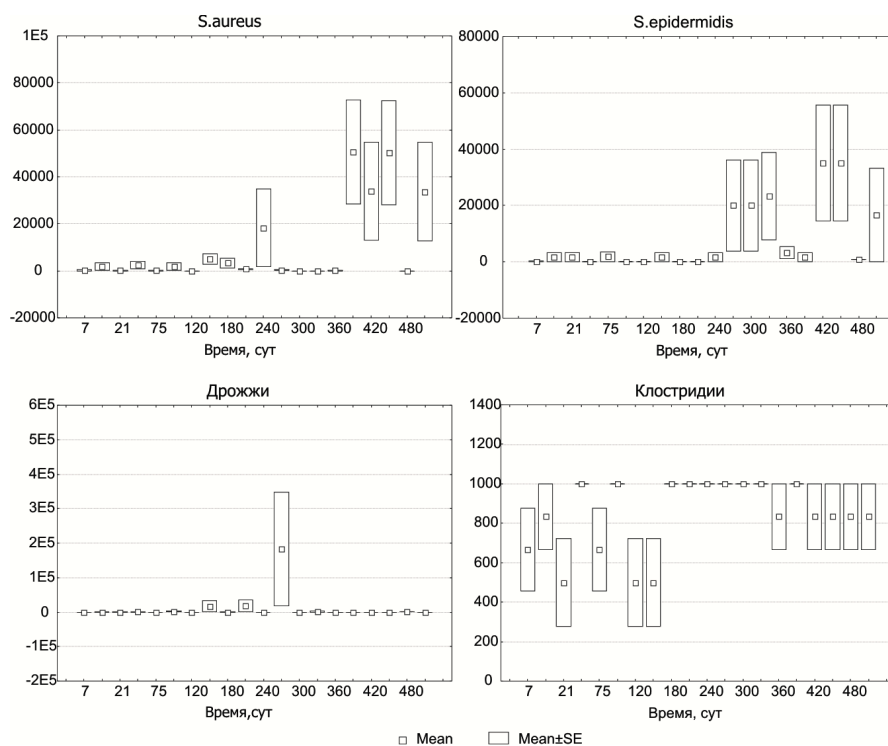


Рис. 4. Динамика изменений микрофлоры кишечника в эксперименте «Марс-500»

носа доминировали непатогенные кокки, включая энтерококки и эпидермальные стафилококки (см. рис. 1). Гемолитические формы грамположительной кокковой флоры и золотистый стафилококк оставались на весьма низких количественных значениях в течение первых двух третей времени изоляции. Практически не встречалась транзитная грамотрицательная микрофлора.

В начале эксперимента на кожных покровах доминировали представители непатогенной кокковой микрофлоры, почти отсутствовал золотистый стафилококк. Вместе с тем на влажосодержащих кожных покровах почти отсутствовали такие важнейшие комменсалы кожной микрофлоры как коринебактерии, и присутствовали представители кишечной флоры, в том числе лактозонегативные кишечные палочки, элиминировавшие из биотопа по окончании курса приема аутопробиотика. В отдаленные сроки после отмены препарата отмечались спорадические подъемы уровня обсемененности патогенными дрожжами и нейссериями, появились и доминировали до окончания эксперимента гемолитические зеленящие стрептококки (рис. 2).

В ротоглотке в период приема препаратов и в последующие 200 сут отсутствовали стафилококки, нейссерии и зеленящие стрептококки. Начиная с 100-х суток эксперимента, наблюдались разовые подъемы численности синегнойной палочки, бактерий кишечной группы, не встречавшиеся в начале эксперимента. В подмышечной впадине отсутствовали эпидермальные и золотистые стафилококки, энтерококки и коринебактерии. Спорадически наблюдался количественный рост патогенной микрофлоры (рис. 3).

Аналогичным образом происходили изменения микрофлоры кишечника. В течение времени приема препарата отмечалась стабилизация клостридий, кишечной палочки. После отмены препарата имели место спорадические подъемы уровня обсемененности лактозонегативных кишечных палочек, дрожжей и клебсиелл, отмечался подъем кокковой микрофлоры (рис. 4).

Основные результаты влияния используемых препаратов на микробиоценоз кишечника в эксперименте «сухая» иммерсия представлены на рис. 5. При использовании кисломолочного продукта с суспендированной культурой лактобацилл происходило интенсивное восстановление лактобацилл и в меньшей степени бифидобактерий. В контрольной группе эти показатели оставались без изменений.

Таким образом, препарат на основе кисломолочного продукта, в котором суспендированы культуры аутоштаммов лактобацилл, бифидобактерий и энтерококков, представляет собой эффективное пробиотическое средство.

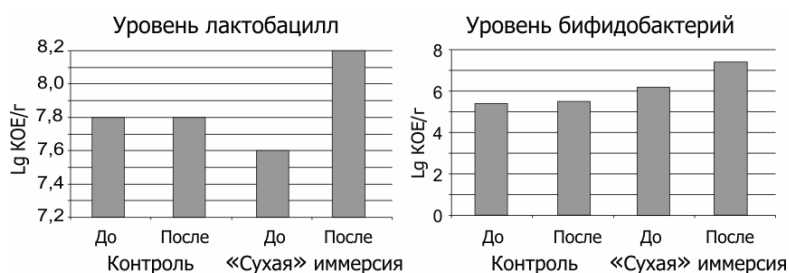


Рис. 5. Характеристика протективной микрофлоры кишечника в эксперименте «сухая» иммерсия

Выводы

1. В результате приема аутопробиотического препарата на основе *Enterococcus faecium* удалось избежать количественного роста условно-патогенных микроорганизмов в период острой адаптации в течение первых нескольких недель эксперимента «Марс-500». Микрофлора всех биотопов в течение периода приема препарата отличалась стабильностью и достаточно высокими показателями протективной микрофлоры.

2. Добавление аутологических штаммов лактобацилл в кисломолочный продукт, употребляемый испытуемыми в эксперименте «сухая» иммерсия, привела к количественному росту протективной микрофлоры кишечника, представленной лактобациллами и бифидобактериями.

Работа выполнена по базовой тематике РАН.

Список литературы

1. Петров Л.Н., Вербицкая Н.Б., Добрица В.П. и др. Бактериальные пробиотики биотехнология, клиника, алгоритмы выбора. СПб., 2008.
Petrov L.N., Verbitskaya N.B., Dobritsa V.P. et al. Bacterial probiotics biotechnology, clinic, selection algorithms. St. Petersburg, 2008.
2. Поликарпов Н.А., Викторов А.Н., Халангот А.Ф. Нуклеазная активность микроорганизмов и проблема контроля за состоянием аутомикрофлоры операторов герметично замкнутых объектов // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1991. № 6. С. 39–42.
Polikarpov N.A., Viktorov A.N., Khalangot A.F. Nuclease activity of microorganisms and the problem of control over the state of automicroflora of operators of hermetically sealed objects // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1991. № 6. P. 39–42.
3. Ильин В.К., Воложин А.И., Виха Г.В. Колонизационная резистентность организма в измененных условиях обитания. М., 2005.
Ilyin V.K., Volozhin A.I., Vikha G.V. Colonization resistance of the organism in changed living conditions. Moscow, 2005.

4. Шендеров Б.А. Пробиотики и функциональное питание // Медицинская микробная экология и функциональное питание. Т. 3. М., 2001. С. 288.

Shenderov B.A. Probiotics and functional nutrition // Medical microbial ecology and functional nutrition. V. 3. Moscow, 2001. P. 288.

5. Бухарин О.В., Вальшев А.В. Биология и экология энтерококков. Екатеринбург, 2012. С. 98.

Bukharin O.V., Valyshev A.V. Biology and ecology of enterococci. Ekaterinburg, 2012. P. 98.

6. Руш К., Руш Ф. Микробиологическая терапия. Теоретические основы и практическое применение. М., 2003. С. 39–40

Rush K., Rush F. Microbiological therapy. Theoretical bases and practical application. Moscow, 2003. P. 39–40.

Поступила 06.06.2018

EXPERIENCE OF USING ENTEROCOCCA- AND LACTOBACILLI-BASED AUTO PROBIOTICS IN EXPERIMENTS WITH LONG-TERM ISOLATION AND «DRY» IMMERSION

Usanova N.A., Morozova Yu.A., Nosovsky A.M., Ilyin V.K.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 34–38

Results of the use of auto probiotics based on Enterococcus faecium and Lactobacillus sp. isolated from volunteers in experiment «Mars-500» and «dry» immersion were reviewed. Consumption of probiotics was found to block the quantitative growth of opportunistic pathogens in the period of acute adaptation to the chamber isolation. In «dry» immersion, consumption of the cultured milk food enriched with autologic Lactobacilli strains stimulated quantitative growth of protective intestinal microflora, Lactobacilli and Bifidobacteria specifically.

Key words: probiotics, auto probiotics, autologic strains, isolation chamber, protective microflora.

УДК 613.6+796.015.2:001.891.57

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ПРОФИЛАКТИКИ НЕГАТИВНЫХ ВЛИЯНИЙ СНИЖЕННОГО УРОВНЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НА ФИЗИЧЕСКУЮ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С 520-СУТОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Уськов К.В.^{1, 2}, Фомина Е.В.^{1, 2, 3}

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

²Московский педагогический государственный университет

³Российский университет дружбы народов, Москва

E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

Сниженный уровень двигательной активности входит в число лидирующих факторов риска развития ряда хронических заболеваний и случаев преждевременной смерти. Влияние сниженного уровня двигательной активности на физическую работоспособность человека изучено в эксперименте с 520-суточной изоляцией, моделирующем полет на Марс. В исследовании приняли участие 6 здоровых мужчин из разных стран. С целью профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности добровольцы выполняли циклические упражнения на активной беговой дорожке (полотно которой приводится в движение мотором), на пассивной беговой дорожке (полотно которой перемещается посредством силы ног человека) и на велоэргометре. Резистивные упражнения выполнялись на силовом тренажере MDS, виброплатформе и с эспандерами. Три паузы в тренировках были включены в дизайн исследования в качестве контрольных периодов «чистой» изоляции, когда тренировочные воздействия не применялись. Дизайн эксперимента позволил выполнить сравнительный анализ эффективности тренировок на каждом из предложенных средств в условиях сниженного уровня двигательной активности. По результатам многопараметрической оценки эффективности средства профилактики распределились в следующем порядке по мере убывания: пассивная беговая дорожка, виброплатформа, силовой тренажер MDS.

Ключевые слова: длительная изоляция, сниженный уровень двигательной активности, физическая работоспособность, циклические тренировки, резистивные тренировки.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 39–46.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-39-46

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает сниженный уровень двигательной активности как четвертый фактор риска по степени общей смертности, на его долю приходится 3,2 млн смертей, случающихся каждый год [1]. Авторы работы [2] приводят следующие данные по

заболеваемости и нарушению состояния здоровья: в 6 % случаев сниженный уровень двигательной активности приводит к заболеваниям сердца, в 7 % случаев является фактором риска развития диабета II типа, в 10 % случаев рака груди и онкологии толстой кишки и в 9 % случаев является причиной преждевременной смерти.

В последние десятилетия в связи с техническим прогрессом, почти полным устранением ручного труда в сфере производства в сочетании с широкой механизацией транспорта и отказом значительной части населения от активного препровождения свободного времени отмечен быстрый рост числа людей, живущих в условиях сниженного уровня двигательной активности [3].

В настоящее время польза от физической нагрузки признается неоспоримой. Регулярное выполнение физических упражнений рассматривают как первичную и вторичную меру профилактики более чем 25 хронических заболеваний и преждевременной смерти [1]. Авторы работы [4] говорят о том, что в настоящее время достоверно установлено, что такая физическая активность, как ходьба и езда на велосипеде соответствующей интенсивности, благотворно влияет на здоровье человека. Международные рекомендации по двигательной активности для поддержания и улучшения здоровья взрослого человека говорят о необходимости выполнения как минимум 150 мин циклической физической активности умеренной интенсивности или 75 мин высокоинтенсивной физической активности в неделю (возможна и комбинация 2 видов физической активности разной интенсивности при равном эквиваленте расхода энергии) [5]. Отмечается также необходимость выполнения резистивных упражнений 2 раза в неделю и более для получения пользы для здоровья [5, 6]. Несмотря на разработанные рекомендации по двигательной активности, около 31 % людей в настоящее время в должной мере их не выполняет [7]. Выполнение физической нагрузки от умеренной до

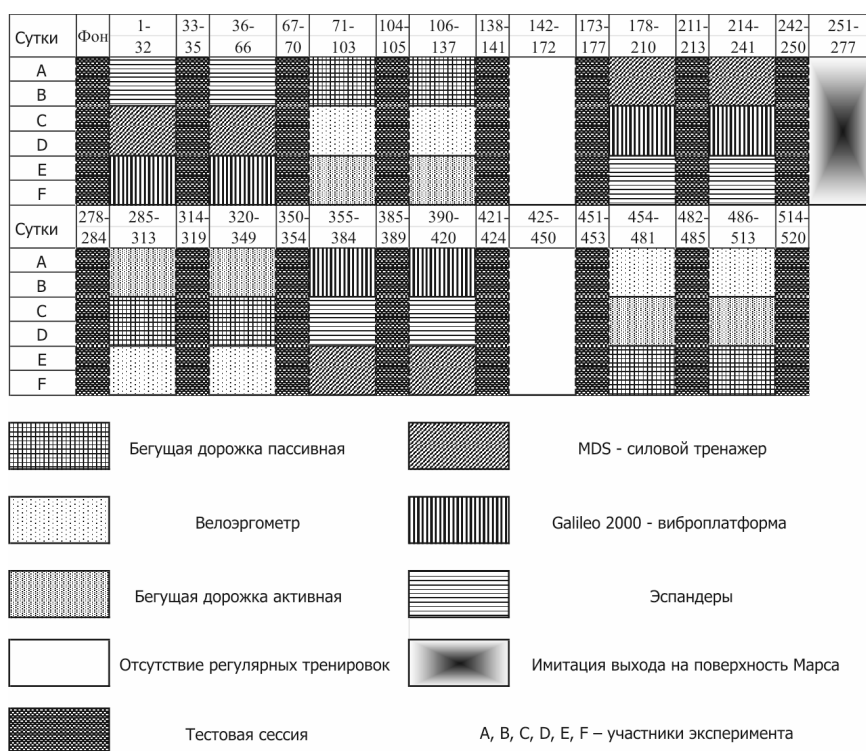


Рис. 1. Дизайн эксперимента с 520-суточной изоляцией

высокой интенсивности в соответствии с рекомендациями по двигательной активности до 27 % снижает риск развития хронических сердечно-сосудистых заболеваний, а также риск преждевременной смерти [8]. В то же время авторы работы [6] отмечают, что упражнения циклического характера, такие, как ходьба и бег, могут быть полезны для лиц, отличавшихся до этого малоподвижным образом жизни, даже в случае выполнения ими менее 150 мин в неделю циклических упражнений, т.е. менее рекомендованного минимума, а относительно резистивных упражнений достаточно выполнение тренировок с низкой интенсивностью. Есть данные, что выполнение физической нагрузки меньшего объема от рекомендованного уровня тоже оказывает значимое благотворное влияние на здоровье человека [1].

Эксперимент с изоляцией 520 сут предложено рассмотреть как модель сниженного уровня двигательной активности современного человека. Цель исследования – сравнительный анализ эффективности различных средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности на физическую работоспособность человека с применением протоколов тренировок, разработанных для длительных космических полетов (КП).

Методика

В эксперименте приняли участие 6 здоровых мужчин. Возраст испытуемых составлял 33 ± 6 лет.

До начала эксперимента добровольцы вели активный образ жизни, но никто из них не имел спортивной квалификации. В соответствии с Хельсинкской декларацией испытуемые дали письменное согласие на участие в эксперименте. Программа эксперимента была одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Участники эксперимента находились 520 сут в условиях изоляции в пространстве ограниченного объема в целях моделирования межпланетного полета на планету Марс.

В течение эксперимента испытуемые выполняли 2 вида физических упражнений: циклические и резистивные. Согласно дизайну эксперимента, в тренировочные периоды длительной изоляции упражнения выполнялись по следующей схеме: циклические упражнения с 71-х до 137-х суток, с 285-х до 349-х суток и с 454-х до 513-х суток, резистивные – с 1-х

по 66-е сутки, с 178-х по 241-е сутки и с 355-х по 420-е сутки нахождения в пространстве ограниченного объема (рис. 1). Дизайн эксперимента также предполагал 3 контрольных периода отсутствия регулярных физических тренировок: с 142-х по 172-е сутки, с 251-х по 277-е сутки и с 425-х по 450-е сутки длительной изоляции, эти периоды были введены в исследование специально, для обеспечения сравнительного анализа, когда двигательная активность была снижена и средства профилактики не применялись.

В данном эксперименте к циклическим упражнениям, т.е. упражнениям, где циклически повторяются одни и те же движения, были отнесены ходьба и бег на бегущей дорожке Cybex 750T с активным режимом работы полотна (полотно дорожки перемещалось с помощью мотора), на бегущей дорожке БД-1 с пассивным режимом работы полотна (полотно дорожки перемещалось посредством силы ног человека) и тренировки на велозергометре Kettler RX7. Все эти упражнения отнесены к циклическим согласно физиологической классификации спортивных упражнений [9].

К резистивным тренировкам были отнесены упражнения, выполняемые с использованием силового тренажера MDS (Multifunctional Dynamometer for Application in Space), с применением бортовых эспандеров, а также упражнения, выполняемые на виброплатформе Galileo 2000. Тренировки, выполняемые на виброплатформе Galileo 2000, были

отнесены к резистивным, так как они включали серию упражнений с дополнительным отягощением.

Известно, что чувствительность организма человека к тренировочным воздействиям изменяется в различные периоды эксперимента, что обусловлено закономерностями адаптации к физическим нагрузкам и мотивацией. В этой связи дизайн эксперимента был построен следующим образом: испытуемые были разделены на 3 группы, каждая из которых выполняла упражнения с использованием какого-либо одного средства, в каждом последующем тренировочном периоде средство менялось (см. рис. 1). В ходе эксперимента каждая группа выполнила тренировки со всеми предложенными средствами, при этом каждое средство применялось на различных этапах длительной изоляции. Такой дизайн исследования позволил нивелировать влияние этапа изоляции при оценке эффективности тренировок на каждом конкретном средстве. При статистической обработке изменения работоспособности добровольцев при использовании одного средства в различные периоды изоляции были объединены в одну группу.

Подробно методика тренировок описана ранее [10].

Оценка уровня физической работоспособности проводилась каждый месяц в ходе 520 сут изоляции в тестовые сессии, которые включали в себя 3 теста. Тест МО-3 выполнялся испытуемыми на бегущей дорожке с пассивным режимом работы полотна и включал в себя 5 ступеней: 3 мин разминочной ходьбы, 2 мин медленного бега, 2 мин среднего бега, 1 мин быстрого бега и 3 мин заключительной ходьбы. Последовательность и длительность каждой ступени локомоторного теста стандартизована, регистрировалась скорость локомоций и частота сердечных сокращений (ЧСС). Испытуемый произвольно выбирал на каждой ступени теста интенсивность работы. По данным, полученным на каждой ступени локомоторного теста, рассчитывалась физиологическая стоимость нагрузки по следующей формуле:

$$PhC = \frac{(HR_{max} - HR_{rest})}{V}, \quad (1)$$

где PhC – физиологическая стоимость нагрузки; HR_{max} – максимальная частота сердечных сокращений; HR_{rest} – частота сердечных сокращений в покое; V – среднее значение скорости.

Второй тест, включенный в сессию по оценке уровня физической работоспособности, – тест PWC_{170} , выполняемый на велоэргометре, характеризуется ступенчато возрастающей нагрузкой с шагом, равным 15 Вт, до субмаксимальной зоны мощности. Третий тест сессии по оценке уровня физической работоспособности проводился на силовом

тренажере MDS – 3 попытки выполнения максимального произвольного усилия в следующих тестах: «жим ногой», «подъем на носки», «сгибание рук на бицепс», «жим лежа от груди». Тест «подъем на носки» выполнялся в изометрическом режиме, все остальные тесты – в изокинетическом режиме.

С целью оценки эффективности средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности вычислялся прирост показателя физической работоспособности по следующей формуле:

$$T_p = \frac{(Y_{after} - Y_{pre})}{Y_{pre}} \times 100\%, \quad (2)$$

где T_p – прирост; Y_{pre} – показатель до начала тренировок на конкретном средстве; Y_{after} – показатель после тренировок на конкретном средстве.

Первоначально выполнено сравнение прироста после выполнения тренировок на каждом средстве, далее была проведена многопараметрическая оценка для создания рейтинга средств профилактики, используемых в эксперименте. Оценка рейтинга средств проводилась на основе 9 показателей в тестах МО-3 и PWC_{170} , а также на основе 9 тестов, выполненных на силовом тренажере MDS. В расчете рейтинга средств учитывался значимый прирост абсолютных значений после 2 мес тренировок на каждом конкретном средстве профилактики. Если прирост от начала тренировок в процентном отношении был больше после 2 мес тренировок по сравнению с показателем на другом средстве, то средству присваивались 100 баллов. Если в тесте тренировки на другом средстве давали также значимое увеличение показателя, то присваивались баллы в соответствии с абсолютным значением прироста при использовании этого средства по сравнению с наиболее эффективным. Баллы, полученные для каждого средства профилактики, по всем учтенным тестам суммировались. Таким образом, многопараметрическая оценка эффективности тренировочных средств позволила ранжировать применявшиеся средства профилактики в эксперименте от наиболее эффективных (набравших наибольшее количество баллов) к наименее эффективным средствам (набравшим наименьшее количество баллов).

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica 10 с использованием непараметрических методов описательной статистики. Критерий Манна – Уитни использовался при сравнении между группами. Различия считались достоверными при $p < 0,05$ и $p < 0,01$.

Результаты и обсуждение

Прежде всего, следует отметить, что далее будет обсуждаться только статистически значимый

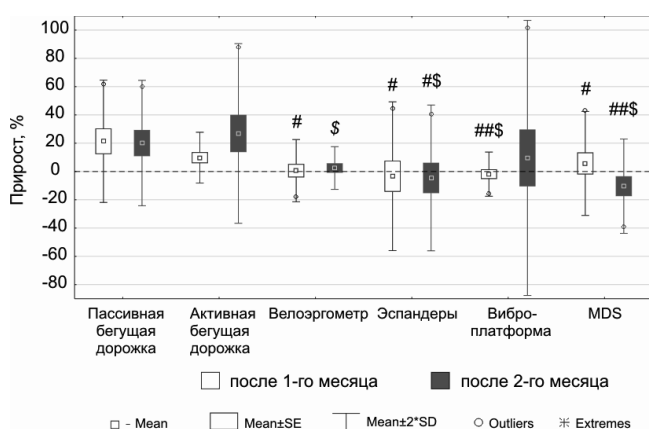


Рис. 2. Прирост уровня физической работоспособности после первого и второго месяцев использования средств тренировки на основе показателя скорости на ступени быстрого бега в тесте МО-3: # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на пассивной бегущей дорожке; \$ – $p < 0,05$, \$\$ – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на активной бегущей дорожке; --- – фоновый уровень

прирост показателей уровня физической работоспособности после периода использования какого-либо средства тренировок.

Наиболее информативным показателем уровня физической работоспособности в тесте МО-3 является ступень быстрого бега [11]. По показателю скорости на ступени быстрого бега в тесте МО-3 выполнение тренировок на бегущей дорожке с пассивным режимом движения полотна в течение 1-го месяца оказалось более эффективными по сравнению со всеми применявшимися средствами, кроме бегущей дорожки с активным режимом движения полотна ($p < 0,05$) (рис. 2). После 2-го месяца тренировок на пассивной бегущей дорожке прирост скорости на данной ступени теста был выше по сравнению с упражнениями, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$) и на силовом тренажере MDS ($p < 0,01$). Бегущая дорожка с активным режимом движения полотна оказалась более эффективна в приросте скорости после 1-го месяца по сравнению с виброплатформой, а после 2-го месяца тренировок по сравнению с велоэргометром ($p < 0,05$), эспандерами ($p < 0,05$) и силовым тренажером MDS ($p < 0,01$).

Следующим анализируемым показателем является физиологическая стоимость работы. Необходимо отметить, что увеличение уровня физической работоспособности в тесте МО-3 отображается в снижении физиологической стоимости нагрузки. Физиологическая стоимость нагрузки на ступени быстрого бега была ниже после тренировок на пассивной бегущей дорожке в сравнении с

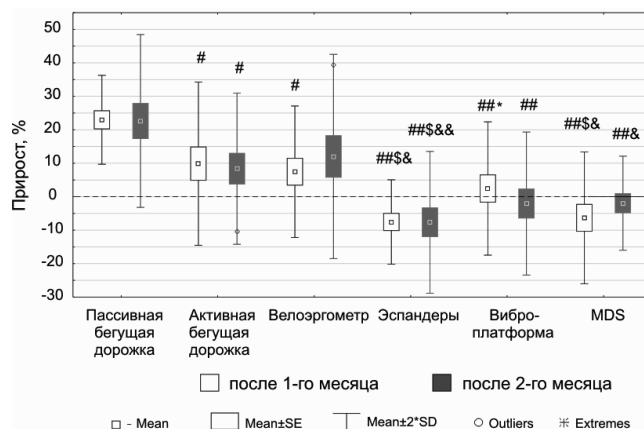


Рис. 3. Прирост уровня физической работоспособности после первого и второго месяцев использования средств тренировки на основе теста PWC170: # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на пассивной бегущей дорожке; \$ – $p < 0,05$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на активной бегущей дорожке; & – $p < 0,05$, && – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на велоэргометре; * – $p < 0,05$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок с эспандерами; --- – фоновый уровень

тренировками, выполненными на велоэргометре ($p < 0,01$), с эспандерами ($p < 0,05$) и на силовом тренажере MDS ($p < 0,05$). Активная бегущая дорожка оказалась более эффективна по сравнению с велоэргометром ($p < 0,05$).

Уровень физической работоспособности в тесте PWC₁₇₀ был выше на ступени быстрого бега после 1-го месяца тренировок на пассивной бегущей дорожке по сравнению со всеми применявшимися средствами ($p < 0,05$) (рис. 3). После 2-го месяца тренировок пассивная бегущая дорожка оказалась более эффективна по сравнению со всеми применявшимися средствами, кроме велоэргометра ($p < 0,05$). Тренировки на активной бегущей дорожке были более эффективными после 1-го месяца в сравнении с упражнениями, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$) и на силовом тренажере MDS ($p < 0,05$). После 2-го месяца тренировок активная бегущая дорожка оказалась более эффективна по сравнению только с эспандерами ($p < 0,05$). Прирост физической работоспособности по показателю теста PWC₁₇₀ был выше после 1-го и 2-го месяцев тренировок на велоэргометре по сравнению с тренировками, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$) и на силовом тренажере MDS ($p < 0,05$). Тренировки на виброплатформе в течение 1-го месяца оказались более эффективными по сравнению с тренировками, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$).

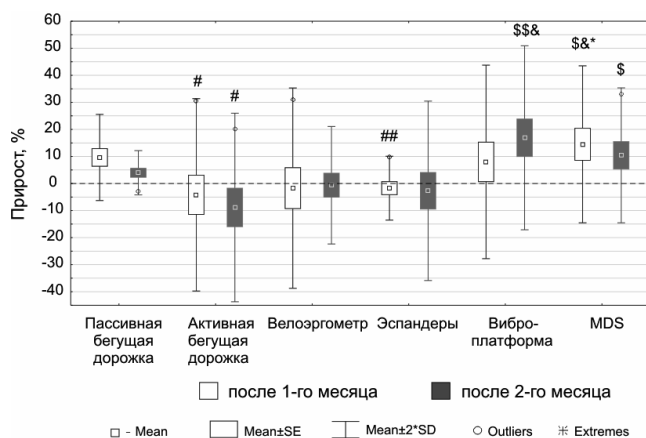


Рис. 4. Прирост уровня физической работоспособности после первого и второго месяцев использования средств тренировки на основе показателя «жим левой ногой» в тесте на MDS: # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на пассивной бегущей дорожке; \$ – $p < 0,05$, \$\$ – $p < 0,01$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на активной бегущей дорожке; & – $p < 0,05$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок на велоэргометре; * – $p < 0,05$ – значимые различия по сравнению с приростом работоспособности после тренировок с эспандерами; --- – фоновый уровень

В тесте «жим лежа от груди» прирост силы после 1-го месяца тренировок на силовом тренажере MDS был выше по сравнению с тренировками, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$) и на активной бегущей дорожке ($p < 0,05$). После 2-го месяца силовой тренажер MDS был более эффективен по сравнению с эспандерами ($p < 0,05$), активной бегущей дорожкой ($p < 0,05$) и бегущей дорожкой с пассивным режимом движения полотна ($p < 0,05$). Тренировки на виброплатформе в течение 1-го месяца оказались более эффективными в сравнении с упражнениями, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$), на велоэргометре ($p < 0,05$) и на активной бегущей дорожке ($p < 0,05$). В течение 2-го месяца тренировок наблюдался больший прирост силы после тренировок на виброплатформе по сравнению с тренировками, выполненными с эспандерами ($p < 0,051$), на велоэргометре ($p < 0,05$) и на пассивной бегущей дорожке ($p < 0,05$). После 1-го месяца тренировок на пассивной бегущей дорожке прирост силы был выше по сравнению с упражнениями, выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,01$), на велоэргометре ($p < 0,05$) и на активной бегущей дорожке ($p < 0,05$).

В тесте «жим левой ногой» прирост силы был выше после 1-го месяца тренировок на силовом тренажере MDS по сравнению с тренировками,

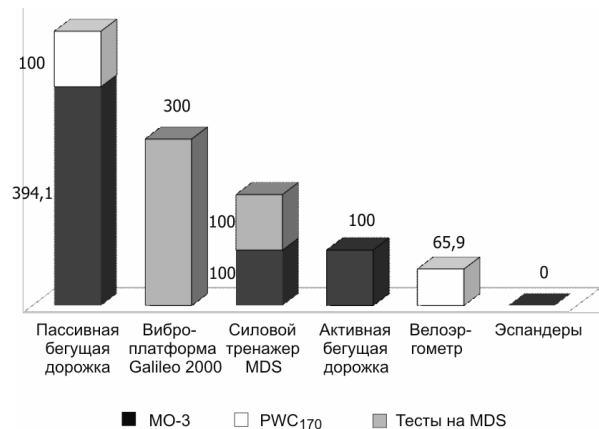


Рис. 5. Рейтинг средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности в баллах по многопараметрической оценке

выполнявшимися с эспандерами ($p < 0,05$), на велоэргометре ($p < 0,05$) и на активной бегущей дорожке ($p < 0,05$) (рис. 4). После 2-го месяца тренировок на силовом тренажере MDS наибольший прирост наблюдался только по сравнению с тренировками на активной бегущей дорожке ($p < 0,05$). Прирост силы на виброплатформе был выше только после 2-го месяца тренировок по сравнению с тренировками, выполненными на велоэргометре ($p < 0,05$) и на бегущей дорожке с активным режимом движения полотна ($p < 0,01$). Пассивная бегущая дорожка оказалась наиболее эффективной по сравнению с эспандерами ($p < 0,01$) и активной бегущей дорожкой ($p < 0,05$) после 1-го месяца тренировок, а также по сравнению с активной бегущей дорожкой после 2-го месяца тренировок ($p < 0,05$).

Прирост силы в тренировках на виброплатформе по результатам теста «жим левой ногой» оказался сопоставим с приростом силы после тренировок на силовом тренажере MDS. Все описанные выше результаты тестирования согласуются с известными представлениями физиологии спорта о закономерностях адаптации организма к специфической физической нагрузке. В этой связи нами была предпринята попытка анализа уровня физической работоспособности на основе многопараметрической оценки эффективности применявшихся средств.

По многопараметрической оценке эффективности средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности наибольший прирост работоспособности на основе анализа тестов отмечен для тренировок на пассивной бегущей дорожке – 494,1 балла, следующими по эффективности оказались тренировки на виброплатформе – 300 баллов, и на 3-м месте по эффективности поддержания физической работоспособности были упражнения на силовом тренажере MDS – 200 баллов (рис. 5). Другими словами,

тренировки на пассивной бегущей дорожке оказались эффективнее тренировок на велоэргометре в 7 раз, тренировок на активной бегущей дорожке – в 5 раз, тренировок на силовом тренажере – в 2 раза, тренировок на виброплатформе – в 1,5 раза.

Таким образом, сравнительный анализ эффективности различных средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности на физическую работоспособность человека с применением протоколов тренировок, разработанных для длительных КП, показал, что наиболее эффективным и по приросту работоспособности и снижению физиологической стоимости нагрузки являются циклические тренировки на пассивной бегущей дорожке при использовании тренировочных режимов, рекомендованных для космонавтов. Наиболее выраженное снижение физиологической стоимости нагрузки отмечено после тренировок на пассивной и активной бегущих дорожках. Результаты свидетельствуют об улучшении функционального состояния кардиореспираторной системы, что согласуется с исследованиями, в которых была показана эффективность интенсивных интервальных тренировок нетренированных ранее молодых мужчин в улучшении функционального состояния кардиореспираторной системы в сравнении с тренировками постоянной интенсивности при учете одинаковой длительности обоих видов тренировок (приблизительно 150 мин в неделю) [6]. Результаты электромиограммы, зарегистрированной во время теста МО-3, описанные нами ранее, показали, что тренировки на дорожке с пассивным режимом работы полотна более эффективны в сохранении свойств мышц нижних конечностей по сравнению со всеми средствами, применявшимися в нашем эксперименте [12]. Интересно, что прирост силы после тренировок на пассивной бегущей дорожке не отличался от прироста после упражнений на силовом тренажере MDS и на виброплатформе, что может являться свидетельством того, что локомоции на пассивной бегущей дорожке способствуют не только адаптации сердечно-сосудистой системы к физической нагрузке, но также увеличивают мышечную силу нижних конечностей.

В случае выстраивания средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности в порядке убывания их эффективности на основе выполненной нами многопараметрической оценки после пассивной бегущей дорожки следует виброплатформа. Эти результаты согласуются с данными, указывающими на благотворное влияние тренировок на виброплатформе в отношении увеличения мышечной силы, костной массы, метаболических перестроек, толерантности к глюкозе, повышению секреции тестостерона и соматотропина [13]. Благотворное влияние на сохранение силы мышц нижних конечностей при

использовании виброплатформы с резистивной нагрузкой описано и в эксперименте с антиортостатической гипокинезией длительностью 56 сут [14]. Увеличение максимальной произвольной силы в тесте «жим левой ногой», а также в тесте «жим лежа от груди» в нашем эксперименте зарегистрировано после периодов использования виброплатформы. Таким образом, тренировки на виброплатформе оказались эффективными по отношению к развитию силы мышц груди, рук и ног. Возможно, высокая эффективность тренировок на виброплатформе обусловлена комплексным воздействием, так как применяемая нами программа тренировок предполагала выполнение упражнений на виброплатформе с дополнительным утяжелением в 20 кг.

Тренировки с использованием силового тренажера MDS оказались эффективными как по результатам теста «жим левой ногой», так и по результатам теста «жим лежа от груди», т.е. силовой тренажер оказался эффективным по отношению к развитию силы мышц ног и рук, что согласуется с результатами других авторов, рекомендующих использование силовых тренажеров для лиц, чья профессиональная деятельность сопряжена со сниженным уровнем двигательной активности [15]. Необходимо также отметить, что преимуществом силового тренажера MDS, применявшегося нами, является его компактность, которая позволяет выполнять упражнения на все группы мышц и может заменить несколько силовых тренажеров [16].

Несмотря на то что в наших исследованиях тренировки на велоэргометре оказались менее эффективными в профилактике негативного влияния сниженного уровня двигательной активности по сравнению с тренировками на бегущих дорожках, считаем необходимым привести данные о том, что и такой вид двигательной активности, как езда на велосипеде, благотворно влияет на здоровье человека [4]. В случае предпочтения таких упражнений и тренировки на велоэргометре могут быть рекомендованы для лиц, чья профессиональная деятельность связана со сниженным уровнем двигательной активности, что ранее было описано в работе, указывающей на эффективность применения тренировок на велотренажере в условиях длительного плавания на надводных морских судах [17], и у лиц, живущих в условиях сниженного уровня двигательной активности [18].

Таким образом, в эксперименте с 520-суточной изоляцией проведен сравнительный анализ эффективности 6 средств профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности на физическую работоспособность человека с применением протоколов тренировок, разработанных для длительных КП. Наиболее эффективным средством оказалась пассивная бегущая дорожка при использовании тренировочных режимов, рекомендованных

для космонавтов. В то же время можно рекомендовать и другие применяемые нами средства с учетом индивидуальных предпочтений и уменьшения риска возникновения состояния монотонии.

Выводы

1. Наиболее эффективным средством профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности в ходе 520-суточной изоляции на основе многопараметрической оценки явилась пассивная бегущая дорожка. Тренировки на данном средстве были эффективнее тренировок на велоэргометре в 7 раз, на активной бегущей дорожке – в 5 раз, на силовом тренажере – в 2 раза и на виброплатформе – в 1,5 раза.

2. Тренировки с эспандерами не обеспечили прироста, но сохранили физическую работоспособность на фоновом уровне. Их можно рекомендовать с учетом индивидуальных предпочтений и в целях уменьшения риска возникновения состояния монотонии.

3. Адекватность системы профилактики негативного влияния сниженного уровня двигательной активности в модельном эксперименте с изоляцией добровольцев подтверждена отсутствием значимого снижения уровня физической работоспособности ниже фонового уровня в периоды применения тренировок.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГНЦ РФ – ИМБП РАН: старшему научному сотруднику, кандидату медицинских наук Поповой Юлии Александровне, доктору медицинских наук Александру Владимировичу Суворову, стажеру-исследователю Черновой Марии Викторовне, младшему научному сотруднику Бабиш Денису Ростиславовичу, старшему научному сотруднику Смолевскому Александру Егоровичу за помощь в реализации исследования.

Работа поддержана базовым финансированием РАН и Российским фондом фундаментальных исследований № 17-04-01826.

Список литературы

1. Warburton D.E., Bredin S.S. Reflections on physical activity and health: what should we recommend? // Can. J. Cardiol. 2016. V. 32. № 4. P. 495–504.
2. Everson-Hock E.S., Green M.A., Goyder E.C. et al. Reducing the impact of physical inactivity: evidence to support the case for targeting people with chronic mental and physical conditions // J. Public Health (Oxf.). 2016. V. 38. № 2. P. 343–351.
3. Амлаев К.Р., Койчуева С.М., Койчуев А.А., Хорошилова Е.Ю. Гиподинамия: как переломить ситуацию. Современные рекомендации по планированию физической

активности (обзор) // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 5–2. С. 518–522.

Amlaev K.R., Koychueva S.M., Koychuev A.A., Khoroshilova E.Yu. Hypodynamia: how to break the situation. The modern recommendations about planning the physical activity (review) // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoy akademii nauk. 2012. V. 14. № 5–2. S. 518–522.

4. Kelly P., Kahlmeier S., Götschi T. et al. Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking and cycling and shape of dose response relationship // Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act. 2014. V. 11. P. 132.

5. Kahlmeier S., Wijnhoven T.M., Alpiger P. et al. National physical activity recommendations: systematic overview and analysis of the situation in European countries // BMC Public Health. 2015. V. 15. P. 133–146.

6. Garber C.E., Blissmer B., Deschenes M.R. et al. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise // Med. Sci. Sports Exerc. 2011. V. 43. № 7. P. 1334–1359.

7. Kruk J. Health and economic costs of physical inactivity // Asian Pac. J. Cancer Prev. 2014. V. 15. № 18. P. 7499–7503.

8. Dhana K., Koolhaas C.M., Berghout M.A. et al. Physical activity types and life expectancy with and without cardiovascular disease: the Rotterdam Study // J. Public Health (Oxf.). 2017. V. 39. № 4. P. e209–e218. DOI: 10.1093/pubmed/fdw110.

9. Фарфель В.С. Управление движениями в спорте. 2-е изд., стереотип. – М., 2011.

Farfel V.S. Management of movements in sports. 2nd ed., stereotyped. Moscow, 2011.

10. Фомина Е.В., Усков К.В. Эффективность тренировок разной направленности в поддержании физической работоспособности в условиях сниженного уровня двигательной активности // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 5. С. 47–55.

Fomina E.V., Uskov K.V. Effectiveness of different training programs for physical performance maintenance in the condition of low motor activity // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2016. V. 50. № 5. P. 47–55.

11. Козловская И.Б., Ярманова Е.Н., Фомина Е.В. Российская система профилактики: настоящее и будущее // Там же. 2013. Т. 47. № 1. С. 13–20.

Kozlovskaya I.B., Yarmanova E.N., Fomina E.V. Russian system of countermeasures: the present and future // Ibid. 2013. V. 47. № 1. P. 13–20.

12. Meigal A., Fomina E. Electromyographic evaluation of countermeasures during the terrestrial simulation of interplanetary spaceflight in «Mars-500» project // Pathophysiol. 2016. V. 23. № 1. P. 11–18.

13. Gojanovic B., Feigl F., Gremion G., Waeber B. Physiological response to whole-body vibration in athletes and sedentary subjects // Physiol. Res. 2014. V. 63. № 6. P. 779–792.

14. Zange J., Mester J., Heer M. et al. 20-Hz whole-body vibration training fails to counteract the decrease in leg muscle

volume caused by 14 days of 6 degrees head down tilt bed rest // Eur. J. Appl. Physiol. 2009. V. 105. № 2. P. 271–277.

15. Zavanela P.M., Crewther B.T., Lodo L. et al. Health and fitness benefits of a resistance training intervention performed in the workplace // J. Strength Cond. Res. 2012. V. 26. № 3. P. 811–817.

16. Козловская И.Б., Ярманова Е.Н., Виноградова О.Л. и др. Перспективы использования тренажера для поддержания и реабилитации свойств мышечного аппарата у различных профессиональных и возрастных групп населения // Теория и практика физической культуры. 2009. № 3. С. 18–20.

Kozlovskaya I.B., Yarmanova E.N., Vinogradova O.L. et al. Perspectives of use of exerciser for keeping and rehabilitation of features of muscular system in different professional and age population groups // Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury. 2009. № 3. P. 18–20.

17. Бородулина Е.В., Елисеева Л.Н. Влияние увеличения двигательной активности на сердечно-сосудистую систему и психоэмоциональный статус моряков в период плавания // Пермский медицинский журнал. 2012. Т. 29. № 6. С. 85–91.

Borodulina E.V., Eliseeva L.N. The effect of increased motor activity on the cardiovascular system and the psychoemotional status of seamen during the voyage // Permskiy meditsinskiy zhurnal. 2012. V. 29. № 6. P. 85–91.

18. Allen N.G., Higham S.M., Mendham A.E. et al. The effect of high-intensity aerobic interval training on markers of systemic inflammation in sedentary populations // Eur. J. Appl. Physiol. 2017. V. 117. № 6. P. 1249–1256.

Поступила 15.05.2018

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF COUNTERMEASURES TO THE NEGATIVE EFFECTS OF REDUCED PHYSICAL ACTIVITY ON HUMAN PHYSICAL PERFORMANCE CAPACITY IN THE EXPERIMENT WITH 520-DAY ISOLATION

Uskov K.V., Fomina E.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 39–46

Reduced physical activity is a leading factor for the risk of some chronic diseases and premature death. Impact of reduced physical activity on physical performance was studied in the 520-d isolation study imitating a mission to Mars. Participants were 6 healthy male volunteers from different countries. To prevent the negative effects of reduced physical activity, the volunteers performed cyclic exercises on the motorized and non-motorized treadmill, and veloergometer. For resistive exercises, the strength developing machine MDS, vibration platform and expanders were used. Three breaks in the training program were included as the «pure» isolation control periods. Also, design of the experiment allowed comparative analysis of the efficiency of each training device in offsetting of reduced physical activity. As a result of multiparametric evaluation, the countermeasures were rated in the next decreasing order: non-motorized treadmill, vibration platform, MDS.

Key words: extended isolation, reduced physical activity, physical performance, cyclic exercises, resistive exercises.

УДК 629.7

СВЕТОИМПУЛЬСНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ В СИСТЕМЕ КОРРЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Чунтул А.В.¹, Козловский А.П.²

¹АО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля»

²Федеральный научный центр физической культуры и спорта, Москва

E-mail: creiscorp@yandex.ru

Статья посвящена проблеме сохранения зрительной работоспособности и предупреждения развития утомления в процессе ответственной профессиональной деятельности. Рассматривались возможности использования метода фотостимуляции мозговой активности в системе восстановления работоспособности авиационных специалистов. Проводилась стимуляция зрительного анализатора у специалистов авиационного профиля световыми импульсами красного, зеленого и синего цвета на частотах α -ритма головного мозга. Целью исследования явились оценка эффективности повышения зрительной работоспособности и улучшения общего психофизиологического состояния человека, а также определение продолжительности курса фотостимуляции органа зрения для получения значимого эффекта. Методика исследования заключалась в проведении сеансов электростимуляции продолжительностью 10 мин в течение нескольких дней. Оценка эффекта проводилась с использованием метода САН и альтернативной шкалы оценки состояния до и после сеанса. Показано улучшение психофизиологического состояния после курса воздействия на зрительный анализатор световых импульсов частотой 10–16 Гц синего, зеленого и красного цвета. Получены данные о кумуляции эффекта воздействия повторных сеансов фотостимуляции и значимом улучшении состояния всех участников исследования при продолжительности курса не менее 6 сеансов.

Ключевые слова: импульсная фотостимуляция, зрительный анализатор, утомление, психофизиология, α -ритм, самочувствие, активность, настроение.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 47–52.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-47-52

Эффективность и надежность профессиональной деятельности во многом зависят от функционального состояния и работоспособности человека-оператора, особенно в экстремальных условиях [1]. При продолжительной или чрезмерной умственной либо физической работе развивается утомление, снижаются работоспособность и психофизиологическая надежность операторской деятельности. В результате создаются условия для неадекватной оценки

рабочей ситуации и совершения несвоевременных и ошибочных действий. В связи с этим разработка и внедрение методов и способов предупреждения развития утомления и снижения работоспособности с использованием простых и эффективных технологий в процессе работы или во время перерывов представляются актуальными [2]. Особую роль эти технологии играют в поддержании работоспособности лиц опасных профессий, в том числе авиационных специалистов, лиц группы управления беспилотными летательными аппаратами, летного состава и космонавтов при решении ими задач деятельности с повышенной нагрузкой на зрительный анализатор [3].

Светоимпульсная стимуляция (СИС) входит в систему методов, применяемых в практике терапевтического лечения и улучшения функционирования зрительного анализатора. К ним относятся инфракрасная лазерная терапия, вакуумный массаж, магнитотерапия, видеокомпьютерный аутотренинг и др. Однако по доступности, простоте и удобству использования, а также в целях профилактики не только зрительного, но и общего утомления наиболее перспективной представляется технология импульсной светостимуляции α -активности коры головного мозга [4].

Стимуляция заключается в поочередном воздействии на сетчатку глаз и активацию ее различных частей световыми сигналами зеленого, красного и синего цвета. Сигналы подаются в установленном ритме и в определенной последовательности с помощью специальных очков-аппаратов. Психофизиологическим механизмом воздействия является активация новых участков нейронных связей в головном мозге и улучшение работы зрительного анализатора [5]. Такое воздействие повышает амплитуду электроэнцефалографических сигналов в диапазоне 10–16 Гц, увеличивает площадь их распространения и улучшает характеристики зрения и зрительную работоспособность [6].

Эффекты светоимпульсной стимуляции взаимосвязаны и коррелируют с процессами оптимизации функционального состояния человека, и

в частности с повышением активности когнитивных функций, обеспечивающих информационную подготовку и принятие решений, в том числе человека-оператора в экстремальных условиях и ситуациях, а также с мозговыми проявлениями возникновения положительного психоэмоционального состояния человека [7]. В связи с воздействием импульсной стимуляции на психофизиологические механизмы активации мозговой активности имелись основания считать, что метод может использоваться не только для терапии и восстановительного лечения при нарушениях функции зрительного анализатора, но и для коррекции функционального состояния и повышения общей работоспособности при утомлении и чрезмерной умственной нагрузке.

Целью исследования явилось получение экспериментального доказательства положительного влияния светового импульсного стимула на психофизиологическое состояние человека.

При импульсной стимуляции применяются различные аппараты. В данном исследовании для светового импульсного фотостимулирования использовались очки-тренажеры «АСИСТ», запатентованные в качестве полезной модели А.П. Козловским в 2010 г. Спектр электромагнитных волн (ЭМВ) был в диапазоне 455–655 нм и включал импульсы красного, зеленого и синего цвета. При этом исключалась коротковолновая часть синего спектра (<455 нм), в которой интенсивно поглощаются небезопасные для сетчатки фотосенсибилизаторы. Фотостимуляция зрительного анализатора с помощью очков «АСИСТ» усиливала α -активность коры головного мозга, что выражалось в увеличении площади их распространения и повышении амплитуды электроэнцефалографических сигналов в диапазоне 10–16 Гц [8].

Методика

Исследование проводилось с участием летчиков-испытателей, эргономистов, авиационных врачей, инженерно-технических работников и других авиационных специалистов Московского вертолетного завода им. М.Л. Миля. В процессе работы они выполняли профессиональные обязанности, которые можно было отнести к деятельности авиационных специалистов, предполагающей различную степень умственного и физического напряжения, приводящего к возникновению ощущения усталости, утомлению и снижению работоспособности, особенно заметному в конце рабочего дня.

Особое внимание при формировании участников исследования уделялось учету противопоказаний к применению метода фотостимуляции. В качестве таких противопоказаний рассматривались лица с эпилепсией, новообразованиями в головном мозге или неустойчивой психикой. Наличие

противопоказаний для участия в исследовании при наличии других заболеваний и состояний здоровья определял офтальмолог. Проведение исследования с участием отобранных лиц было одобрено комиссией предприятия по этике с оформлением соответствующего протокола № 10 от 5 октября 2016 г.

Курсы фотостимуляции представляли собой индивидуальные схемы, корректируемые в соответствии с рекомендациями офтальмолога, результатами оценки состояния зрительного анализатора и ощущениями участников исследования в процессе стимуляции.

В исследовании участвовало 19 человек, с которыми в общей сложности проведено 105 сеансов фотостимуляции. Из рассмотрения материалов исследования исключили случаи, в которых его участники прошли курс фотостимуляции, состоящий из 1–3 сеансов. Такая продолжительность курса не обеспечивала получения достоверных оценок эффекта стимуляции в связи с периодом адаптации, как правило, характеризующегося разнонаправленными реакциями на светостимуляцию.

Участники исследований проходили курсы разной продолжительности. В течение рабочего дня проводилось не более 2 сеансов, каждый продолжительностью 10 мин. Циклы импульсов во время сеансов предъявлялись в диапазоне α -ритма с частотой от 10 до 16 Гц и были равной длительности. Воздействие проводилось поочередно на левый и правый глаз. Это обеспечивало своевременную регенерацию зрительного пурпура в клетках сетчатки в промежутках между воздействиями. Перед каждым сеансом стимуляции и непосредственно по его окончании проводился опрос по методике САН [9]. Для анализа результатов опроса использовали обобщенный показатель САН без разделения на компоненты. После каждого сеанса испытуемые оценивали его эффективность по альтернативной шкале (эффект есть – 1 балл, эффекта нет – 0 баллов) по следующим субъективным ощущениям: улучшение восприятия зрительной информации; ощущение отдыха, снижение напряженности, улучшение настроения, повышение остроты зрения и расширение полей зрения. Средние значения показателей оценки определялись по каждому участнику эксперимента, по всем участникам, по каждому сеансу и по всем сеансам фотостимуляции. Статистический анализ данных осуществляли с использованием программы IBM SPSS (версия 23). Для определения критериев статистической оценки на первом этапе анализировалось распределение изучаемых признаков с использованием параметрического теста и критерия Колмогорова – Смирнова (с поправкой Лиллиефорса). Решение о нормальности распределения принималось при уровне значимости $p > 0,05$. Правило о возможности использования параметрических методов оценки учитывалось только при

Таблица 1

Статистические показатели САН по результатам проведенного курса СИС

№ п/п	Обследованные	Кол-во сеансов	Средние величины обобщенного показателя САН		Динамика, %
			До сеанса стимуляции	После сеанса стимуляции	
1	Б.С.С.	9	4,38	4,16	-4,68
2	Б.В.А.	6	4,08	4,57	14,31
3	Г.Е.В.	6	5,92	6,18	5,93
4	З.Т.П.	5	5,50	6,50	19,23
5	К.А.М.	10	5,32	5,93	11,94
6	К.А.Д.	6	4,90	5,07	3,64
7	Л.А.В.	9	5,52	6,53	29,17
8	Л.Б.П.	4	5,38	6,03	14,54
9	Н.А.М.	6	5,55	5,78	4,46
10	Н.М.В.	5	5,84	5,86	0,38
11	Н.М.В.	6	5,12	5,12	0,36
12	П.И.А.	4	3,10	3,20	16,32
13	П.В.В.	15	5,61	5,94	7,11
14	Ч.А.В.	4	4,15	5,05	22
Средние величины			5,03	5,42	10,34
Медиана			5,35	5,82	9,53

Таблица 2

Результаты проверки нормальной формы распределения показателей САН

Этапы эксперимента	Тест Колмогорова – Смирнова*			Критерий Шапиро – Уилка		
	Показатель	N	Значимость, p	Показатель	N	Значимость, p
До стимуляции	0,213	14	0,086	0,876	14	0,051
После стимуляции	0,218	14	0,071	0,905	14	0,133

Примечание. * – коррекция значимости Лиллиефорса.

$p > 0,2$. Если нормальное распределение значений не подтверждалось (при $p < 0,2$) использовался непараметрический тест Уилкоксона.

Результаты и обсуждение

Анализ данных оценки состояния участников исследования показал, что после прохождения курса сеансов светоимпульсной стимуляции практически у всех авиационных специалистов (99,9 %) обобщенный показатель САН повысился (табл. 1).

Вместе с тем наблюдались существенные различия между величинами средних и медиан внутри выборки до и после сеанса фотостимуляции. Поэтому для выбора метода статистической оценки достоверности различий между показателями

САН до и после курса светоимпульсной стимуляции анализировался характер распределения данных с помощью теста Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса и с критерием Шапиро – Уилка (табл. 2).

Из представленных в табл. 2 значений показателей САН следует, что во всех случаях значимость (p) не превышает 0,2. Это означает, что полученные данные не подчиняются закону нормального распределения и для их анализа в этом случае необходимо использовать метод непараметрической статистики, в частности, тест Уилкоксона. Задачей теста являлось подтверждение или опровержение нулевой гипотезы об отсутствии различий между связанными выборками показателей САН до и после сеанса светоимпульсной стимуляции.

Таблица 3

Сравнение показателей САН до и после сеансов СИС в общей группе наблюдений с использованием теста Уилкоксона

Нулевая гипотеза	Критерий	Значение	Решение
Медиана разностей между показателями САН до и после стимуляции равна нулю	Критерий знаковых рангов Уилкоксона для связанных выборок	0,004	Нулевая гипотеза отклоняется

В табл. 3 приведены результаты теста Уилкоксона, направленного на оценку полученных данных световой импульсной стимуляции в общей выборке.

Из представленных в табл. 3 данных сравнения показателей САН до и после сеансов СИС с использованием теста Уилкоксона следует, что нулевая гипотеза об отсутствии статистически значимых различий в связанных показателях САН до и после воздействия отклоняется. Это доказывает положительное влияние проведенных курсов на психофизиологическое состояние участников исследования по критерию, объединяющему их самочувствие, активность и настроение. Повышение средних значений обобщенного показателя САН после всех сеансов фотостимуляции по всей выборке, как это показано в табл. 1, превысило 10 %.

Достоверно (с коэффициентом корреляции $R = 0,717$) установленная статистическая зависимость улучшения самочувствия в результате фотостимуляции от времени работы, а значит, и степени утомления участников исследования представлена на рис. 1.

Выявленная зависимость описывается уравнением линейной регрессии:

$$y = -11,292 + 3,537 x,$$

где y – величина улучшения значений показателя САН (в %); x – время проведения сеанса от начала работы (ч).

Наиболее заметно эффект улучшения состояния ощущался после 6-го часа работы. В случаях, когда фотостимуляция проводилась в конце рабочего дня или после его окончания, положительный эффект оценивался как еще более выраженный. Такая оценка эффекта сеансов фотостимуляции была обусловлена, прежде всего, развитием и нарастанием в процессе работы умственного и физического утомления и изменением психоэмоционального состояния к концу рабочего дня. На фоне исходного высокого уровня работоспособности в начале трудового дня эффект положительного воздействия фотостимуляции на функциональное состояние по показателям САН значимо не ощущался. Но при развитии утомления, ухудшении самочувствия и ощущении усталости в конце рабочего дня положительное влияние фотостимуляции на восстановление функционального состояния отмечалось всеми участниками исследования.

Эффект фотостимуляции становился более заметным по мере увеличения количества проведенных сеансов. Обобщенные данные (по 9 участникам после 6 сеансов) зависимости улучшения значений показателя САН от количества сеансов фотостимуляции представлены на рис. 2.

Заметным эффект фотостимуляции, по мнению участников исследования, становился после 5–6-го сеанса. В связи с этим можно говорить о кумуляции эффекта воздействия повторных сеансов фотостимуляции и значимом улучшении психофизиологического состояния при продолжительности курса не менее 6 сеансов.

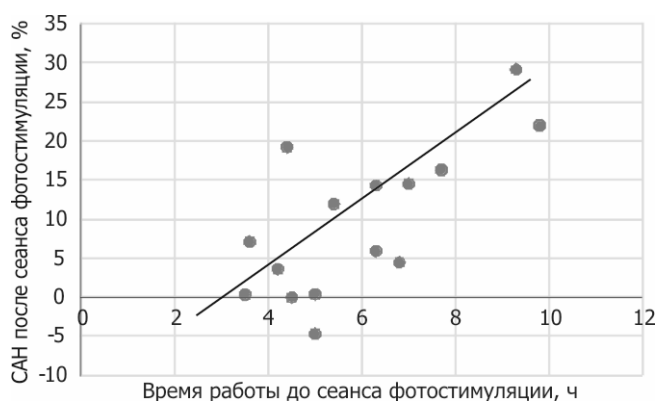


Рис. 1. Зависимость значений улучшения показателя САН от времени проведения сеансов фотостимуляции от начала работы (в %)



Рис. 2. Изменение значений показателя САН от продолжительности курса фотостимуляции (в %)

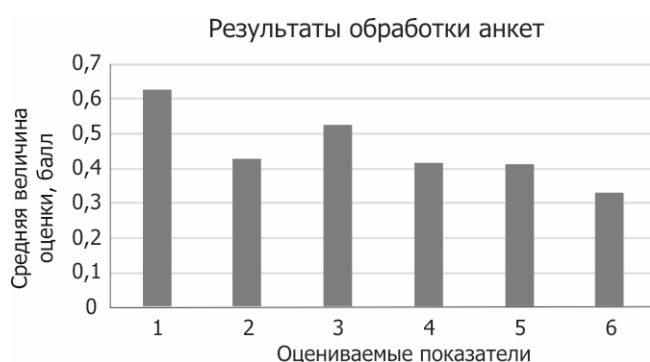


Рис. 3. Оценка эффективности фотостимуляции по отдельным характеристикам функционального состояния. Оцениваемые показатели: 1 – улучшение восприятия зрительной информации; 2 – ощущение отдыха; 3 – снижение эмоциональной напряженности; 4 – улучшение настроения; 5 – повышение остроты зрения; 6 – расширение полей зрения

Результаты исследования, полученные по методике САН, полностью согласовывались с данными анкетирования (рис. 3). Представленные на рис. 3 оценки участников исследования свидетельствуют о положительном влиянии фотостимуляции, прежде всего, на улучшение восприятия зрительной информации. В связи с тем что профессиональная деятельность авиационных специалистов, участвовавших в исследовании, была связана с восприятием показаний различных приборов и информации, отображаемой на цифровых и текстовых табло и электронных экранах, это способствовало повышению качества профессиональной деятельности. Данное обстоятельство с отмеченным выше снижением эмоциональной напряженности явилось дополнительным аргументом положительной оценки СИС и ее эффективности применения для поддержания и восстановления работоспособности при развитии утомления в процессе работы.

Таким образом, в результате исследования получены данные о положительном влиянии курса светоимпульсной стимуляции на психоэмоциональное состояние специалистов авиационного профиля в рабочее время. Учитывая полученные результаты, следует полагать, что метод импульсной фотостимуляции может использоваться для повышения работоспособности в условиях развития утомления не только авиационных специалистов, но и членов экипажей при продолжительных полетах.

Данные исследования согласуются с результатами ранее проведенных экспериментов, в которых отмечалось повышение не только зрительной работоспособности, но и общего психофизиологического состояния организма при активации α -ритма головного мозга в ответ на фотостимуляцию. Все это свидетельствует о практической целесообразности

использования метода СИС зрительного анализатора для улучшения психофизиологического состояния человека в интересах повышения работоспособности при выполнении профессиональной деятельности в условиях утомления и снижения ее психофизиологической надежности.

Проведенное исследование можно рассматривать в качестве апробации технологии использования фотостимуляции для поддержания работоспособности и психофизиологической надежности не только авиационных специалистов, но и лиц группы управления полетами в процессе продолжительных дежурств и членов экипажей при длительных полетах.

Выводы

1. Сеансы стимуляции зрительного анализатора световыми импульсами синего, зеленого и красного цвета с частотой 10–16 Гц в диапазоне электромагнитных волн длиной 455–655 нм оказывают положительное влияние на психофизиологическое состояние человека, о чем свидетельствуют показатели САН и результаты анкетирования участников экспериментального исследования.

2. Положительный эффект светоимпульсной стимуляции зрительного анализатора в использованном диапазоне частот и длин электромагнитных волн проявляется в большей степени при выраженном утомлении в процессе операторской деятельности авиационных специалистов.

3. В результате исследования влияния СИС на функциональное и эмоциональное состояния авиационных специалистов получены данные о кумуляции эффекта воздействия повторных сеансов фотостимуляции и значимом улучшении психофизиологического состояния всех участников исследования при продолжительности курса не менее 6 сеансов.

Авторы благодарят участников экспериментов и А.А. Меденкова за рекомендации по улучшению представления материалов экспериментального исследования для более полного раскрытия его содержания и перспектив использования полученных результатов.

Список литературы

1. Наумов И.А., Корнилова Л.Н., Глухих Д.О. и др. Влияние повторных космических полетов на зрительное слежение // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 1. С. 17–27.
- Naumov I.A., Kornilova L.N., Glukhikh D.O. et al. Influence of repetitive spaceflight on visual tracking // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2016. V. 50. № 1. P. 17–27.

2. Макаров И.А., Воронков Ю.И. Влияние физических нагрузок в положении лежа на внутриглазное давление // Там же. 2017. Т. 51. № 2. С. 47–51.

Makarov I.A., Voronkov Yu.I. Effect of physical loads on human lying on intraocular pressure // Ibid. 2017. V. 51. № 2. P. 47–51.

3. Коваленко П.А., Пономаренко В.А., Чунтул А.В. Учение об иллюзиях полета: Основы авиационной делиологии. М., 2007.

Kovalenko P.A., Ponomarenko V.A., Chuntul A.V. Study about illusions of flight: Basis of aviation deliology. Moscow, 2007.

4. Козловский А.П., Кузнецова Н.В. Перспектива применения фотостимуляции зрительного анализатора в спортивной медицине // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2011. № 8. С. 197–201.

Kozlovsky A.P., Kuznetsova N.V. Vista of photo stimulation application of visual analyzer in sports medicine // Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsiny. 2011. № 8. P. 197–201.

5. Осипова М.А., Арьков В.В., Тоневицкий А.Г. Модуляция альфа-ритма и вегетативного статуса человека с использованием цветовой фотостимуляции // Там же. 2010. № 6 (149). С. 699–703.

Osipova M.A., Ar'kov V.V., Tonevitsky A.G. Modulation of alpha rhythm and human vegetative status under using color photo stimulation // Ibid. 2010. № 6 (149). P. 699–703.

6. Базанова О.М. Современная интерпретация альфа-активности электроэнцефалограммы // Международный неврологический журнал. 2011. № 8 (46). С. 210–260.

Bazanova O.M. Modern interpretation of EEG alpha activity // Mezhdunarodny nevrologicheskiy zhurnal. 2011. № 8 (46). P. 210–260.

7. Klimesch W. EEG alfa and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analyzes // Brain Res. Rev. 1999. V. 29. P. 169–195.

8. Козловский А.П., Арьков В.В., Кузнецова Н.В. и др. Фотостимуляция в спортивной медицине // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2011. № 10 (94). С. 16–21.

Kozlovsky A.P., Ar'kov V.V., Kuznetsova N.V. et al. Photostimulation in sports medicine // Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina. 2011. № 10 (94). P. 16–21.

9. Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Мирошников М.П., Шарай В.Б. Тест дифференцированной самооценки функционального состояния // Вопросы психологии. 1973. № 6. С. 141–145.

Doskin V.A., Lavrent'eva N.A., Miroshnikov M.P., Sharai V.B. Test of differentiated self-evaluation of functional status // Voprosy psikhologii. 1973. № 6. P. 141–145.

Поступила 02.04.2018

PULSING LIGHT STIMULATION IN STATE CORRECTION OF AVIATION PERSONNEL

Chuntul A.V., Kozlovsky A.P.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 47–52

The paper contemplates the topic of visual function support and fatigue prevention during responsible professional activities. Integration of brain photostimulation in the system of aviation personnel rehabilitation has been suggested following the investigation of visual analyzer stimulation by pulses of red, green and blue light in the α -rhythm range as a way to improve vision and general psychophysiological condition, and also to determine length of the photostimulation course for a reliable effect. Stimulation sessions in the investigation were 10 min and repeated several days. Their effectiveness was evaluated using the SAN questionnaire and an alternative psychophysiological scale before and after session. It was found that the course of visual analyzer stimulation by blue, green and red pulses at 10–16 Hz was favorable to the psychophysiological state of subjects. Repeated sessions had a cumulative effect and significant improvements were observed in all the subjects who had visited no less than 6 sessions.

Key words: pulsing photostimulation, visual analyzer, fatigue, psychophysiology, α -rhythm, general state, activity, mood.

УДК 612.821.2+616.8-092

ВОЗДЕЙСТВИЕ ОСТРОЙ ГИПОБАРИИ НА ПОВЕДЕНИЕ И ДОЛГОВРЕМЕННУЮ ПАМЯТЬ КРЫС

Семенов Д.Г., Беляков А.В.

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

E-mail: dsem50@rambler.ru

Проведено воздействие острой барокамерной гипобарической гипоксии на крыс линии Wistar с целью выявления ее влияния на поведение и долговременную память, которые оценивали парным тестированием в приподнятом крестообразном лабиринте (ПКЛ), совмещенным с тестом transfer latency. Показано, что тяжелое гипобарическое воздействие (180 мм Hg, 3 ч), в отличие от умеренного (360 мм Hg, 2 ч, 3 раза, с интервалом в сутки), полностью снимает эффект торможения исследовательской активности, характерный для ретеста ПКЛ у изначально низко-тревожных особей, что совпадает со значительным подавлением их пространственной памяти. Таким образом, можно предположить, что у крыс, подвергнутых острой тяжелой гипобарической гипоксии, развивается амнезия и связанные с этим нарушения механизмов хабитуации. При умеренной прерывистой гипоксии таких эффектов не наблюдали.

Ключевые слова: поведение, пространственная память, приподнятый крестообразный лабиринт, тест/ретест, острая гипобарическая гипоксия.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 53–57.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-53-57

Оценка влияния острой гипоксии различной тяжести на высшие функции мозга человека важна при подборе и подготовке персонала ряда гражданских и военных профессий, связанных с авиацией, флотом, экстремальными факторами среды, определенными видами спорта и др. Одной из методически удобных и экологически оправданных экспериментальных моделей гипоксии выступает имитация острого высокогорного воздействия в условиях барокамеры. Известно, что даже кратковременная острая гипобарическая гипоксия (несколько минут на высоте свыше 7000 м) оказывает угнетающее действие на когнитивные функции человека, в том числе на кратковременную [1] и долговременную память. При этом степень амнестического эффекта зависит не только от тяжести гипоксии, но и от индивидуальных психофизических характеристик испытуемых [2].

Гипобарические эксперименты на крысах позволяют вскрыть некоторые механизмы транзиторной

амнезии, возникающей после 3-суточного воздействия тяжелой гипобарической гипоксии, эквивалентной пребыванию на высоте 7500 м [3] или 7-часового пребывания на высоте 8325 м [4]. Вместе с тем есть указания на прямо противоположный эффект и иные механизмы действия умеренной гипобарической гипоксии на когнитивные функции [5, 6]. А многодневная процедура повторяющихся сессий гипобарии «на высоте» 5000 м, применяемая в качестве тренировки (прекондиционирования), существенно снижала амнестический эффект последующей тяжелой церебральной ишемии у мышей [7].

В работах нашей лаборатории на клеточном уровне была показана реорганизация глутаматергической внутриклеточной сигнализации [8], активация системы протеинкиназы B (Акт) [9], повышенная экспрессия проадаптивных генов и их продуктов [10] в период формирования нейропротективного эффекта в модели 3-разовой preconditionирующей умеренной гипобарической гипоксии (ЗУГГ) при 360 мм Hg. Ряд этих результатов указывает на активацию синаптической пластичности и выработку нейротрофинов, что позволяет предположить позитивное влияние на когнитивные функции и память. В противоположность этому применяемая в лаборатории процедура тяжелой гипобарической гипоксии с 3-часовым пребыванием крыс при 180 мм Hg (ТГГ) приводила к 50 % летальности, а у выживших животных сопровождалась апоптотической гибелью части нейронов гиппокампа и неокортекса [11]. На поведенческом уровне ТГГ производила анксиогенный эффект и угнетала когнитивные функции [12]. Однако отсутствуют прямые данные о воздействии гипобарических моделей ЗУГГ и ТГГ на поведение и память крыс, тестируемых в приподнятом крестообразном лабиринте (ПКЛ).

Тест ПКЛ, входящий в число общепринятых методов доклинических исследований ряда фармпрепаратов на грызунах, пригоден и для характеристики психоневрологических последствий гипобарической гипоксии [7]. В этом плане парадигма парного ПКЛ (пПКЛ), позволяющая тестировать каждое животное до и после экспериментального воздействия,

дает возможность учитывать изначальный индивидуальный поведенческий фенотип каждой особи. Кроме этого, она позволяет оценивать долговременную пространственную память с помощью дополнительного теста transfer latency (TL), который не обладает столь высокой стрессогенностью, как традиционное тестирование в лабиринте Морриса. При этом показано, что TL-тестирование не интерферирует с классической для ПКЛ оценкой тревожности [13–15]. Сам эффект ретеста, характерный для пПКЛ [16], может быть вычленен из полученных данных введением соответствующей контрольной группы. Таким образом, задача данного исследования состояла в определении эффектов ТГГ и ЗУГГ на поведенческие характеристики и долговременную пространственную память крыс методами пПКЛ, совмещенным с TL.

Методика

Работа проведена на взрослых самцах крыс линии Wistar массой 180–200 г, взятых из биокolleкции Института физиологии им. И.П. Павлова РАН. Все процедуры, связанные с содержанием и использованием животных, проводили с соблюдением директив Совета Европейского сообщества (86/609/ЕЕС), регламентирующих использование животных для экспериментальных исследований. Протоколы опытов утверждены Комиссией по гуманному обращению с животными Института физиологии им. И.П. Павлова РАН. Перед началом исследований животные проводили в лабораторных условиях 4 сут в стандартных клетках по 6 особей без пересортировки, при свободном доступе к воде и пище и режиме освещения 12/12 ч.

Для поведенческого тестирования был применен модифицированный инструмент ПКЛ для крыс (длина рукавов 50 см, ширина рукавов 14 см, высота стенок закрытых рукавов 30 см, высота над полом 90 см) [17]. Тестирование в ПКЛ как при первичном, так и при повторном его посещении начинали с определения TL, т.е. времени, потраченного на уход от позиции посадки в открытом рукаве (носом от центра) до входа в любой закрытый рукав. Для количественной оценки памяти был применен «индивидуальный индекс памяти» (ИИП), определяемый по формуле $\text{ИИП} = 1 - \text{TLt}/\text{TL}_0$, где TLt и TL_0 латентность ухода при повторном (через t сут) и первичном (0 сут) посещении ПКЛ соответственно.

По завершении TL теста животному, вошедшему в закрытый рукав, предоставлялось 5 мин для обследования всего лабиринта. В ходе предварительной оценки результатов эксперимента из 10 поведенческих характеристик ПКЛ-тестирования были выбраны 4 валидные характеристики: $n(O + Ц)$ – суммарное число посещений открытых рукавов и задержек в центральном участке; $t(O + Ц)$ – время,

потраченное на это (характеристика тревожности); nC – число свешиваний (характеристика исследовательской активности); nПЗ – число пробежек в закрытых рукавах (характеристика локомоторной активности). Изначальная тревожность определялась в первичном ПКЛ для каждого животного путем вычисления «индивидуального индекса тревожности» (ИИТ) по формуле $\text{ИИТ} = 1 - 0,5(tO/300 + nO/nO3)$ [16], где tO – время (в с), проведенное в открытых рукавах; nO – число их посещений; nO3 – общее число посещений открытых и закрытых рукавов.

Протестированы 4 группы животных: 1-я группа с предъявлением пПКЛ с интервалом 1 сут; 2-я группа – с тем же интервалом и ТГГ между тестами; 3-я группа – с пПКЛ с интервалом 3 сут; 4-я группа – с тем же интервалом и ЗУГГ в этот период.

Умеренные гипобарические воздействия создавали в барокамере проточного типа (КГ2-760/450 «Таганай», ООО «Барогипоксия», Россия) путем постепенного разрежения воздуха (скорость «подъема» не превышала 5 м/с) с периодическими остановками через каждые 100 мм Hg возрастающей длительности. Каждый сеанс ЗУГГ длился 2 ч при атмосферном давлении 360 мм Hg. Интервал между сеансами составлял 24 ч. ТГГ создавалась однократно в виде 3-часовой экспозиции при давлении 180 мм Hg, которое достигалось при той же скорости и аналогичном «ступенчатом» режиме подъема, что и для УГГ. Столь высокое разрежение создавалось в специально изготовленной барокамере проточного типа объемом 0,1 м³, разделенной на 6 секций для 6 животных. Более подробно детали гипобарических процедур описаны ранее для УГГ [19] и ТГГ [20]. Первичное тестирование в ПКЛ проводили непосредственно перед началом ЗУГГ или ТГГ, а ретест – через сутки после их завершения.

Для отделения эффектов ТГГ и ЗУГГ от эффектов ретеста ПКЛ в каждой из 4 групп для каждого животного определяли разницу между показателями ретеста и показателями первичного тестирования и далее сравнивали средние значения разниц ($\pm S.E.M.$), полученных для контрольных и экспериментальных групп (1-я со 2-й гр.; 3-я с 4-й гр.). Достоверность различий устанавливалась по критерию Стьюдента с вероятностью $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Поведенческое фенотипирование животных по результатам первичного теста ПКЛ. При вычислении ИИТ животных, впервые подвергнутых тесту ПКЛ ($n = 98$) было получено распределение, позволяющее разделить весь массив на 2 приблизительно равные подгруппы с ИИТ $> 0,90$ и ИИТ $< 0,91$ и назвать их соответственно «высокотревожные» (ВТ) и «низкотревожные» (НТ). Усредненные значения ИИТ для ВТ и НТ составили $0,98 \pm 0,03$ и $0,78 \pm 0,07$

соответственно. Выделенные группы при первичном тестировании в ПКЛ достоверно и сильно различались по величине своих валидных характеристик.

Воздействие гипобарии на поведенческие характеристики в ПКЛ. Ретест ПКЛ с 1-суточным интервалом у контрольных животных НТ группы показал снижение посещаемости открытых и центральных областей и числа свешиваний, но не локомоторной активности. Этот результат показывает, что так называемый феномен «анксиогенности» ПКЛ действительно проявляется в ретесте, но одновременно с подавлением исследовательского поведения (показатель nC). Вместе с тем локомоторная активность у этой группы животных, очевидно, не участвует в формировании указанного феномена. ТГГ, полностью ликвидировала этот эффект, вероятно устранив его причину (рис. 1, А). В группе ВТ ни контрольный ретест, ни ретест после ТГГ не повлияли на и без того низкие значения всех ее характеристик (см. рис. 1, Б).

Ретест ПКЛ с 3-суточным интервалом проявлял в контрольной группе НТ тот же эффект, что и 1-суточный ретест. А ЗУГГ ограничило ретестовое падение лишь показателей $n(O + Ц)$ и $t(O + Ц)$ (тревожность), причем в существенно меньшей степени, чем ТГГ, а на исследовательскую и локомоторную активность не повлияла (см. рис. 1, В). В группе ВТ у контрольных животных снижение характеристик при 3-суточном ретесте (в отличие от 1-суточного) хоть и обнаруживалось, но выражено было значительно слабее, чем в контрольной НТ группе. Однако после ЗУГГ в этой группе проявился эффект ретеста в той же мере, как и в НТ группе (см. рис. 1, Г).

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что животные НТ фенотипической группы при повторном предъявлении ПКЛ, как с 1-суточным, так и с 3-суточным интервалом, демонстрируют снижение общей исследовательской активности, включающей и посещаемость открытых участков. Если предположить, что причиной такого снижения ретестовых показателей является сохраненная пространственная память о первичном посещении ПКЛ, то ТГГ, полностью ликвидирующая эффект ретеста, очевидно, стирает суточную память. В противоположность этому ЗУГГ, которая не изменяет характерное для контроля ретестовое торможение исследовательской и локомоторной активности и лишь несколько уменьшает смещение характеристик тревожности, вероятно, не оказывает на пространственную память столь мощного влияния, как ТГГ. Для проверки этих предположений были обчислены результаты ТЛ-тестирования обеих фенотипических групп, подвергавшихся ТГГ или ЗУГГ.

Воздействие гипобарии на долговременную пространственную память. Суточный интервал между тестом и ретестом ПКЛ приводил к значительному сокращению времени ТЛ1 по сравнению с ТЛ0.

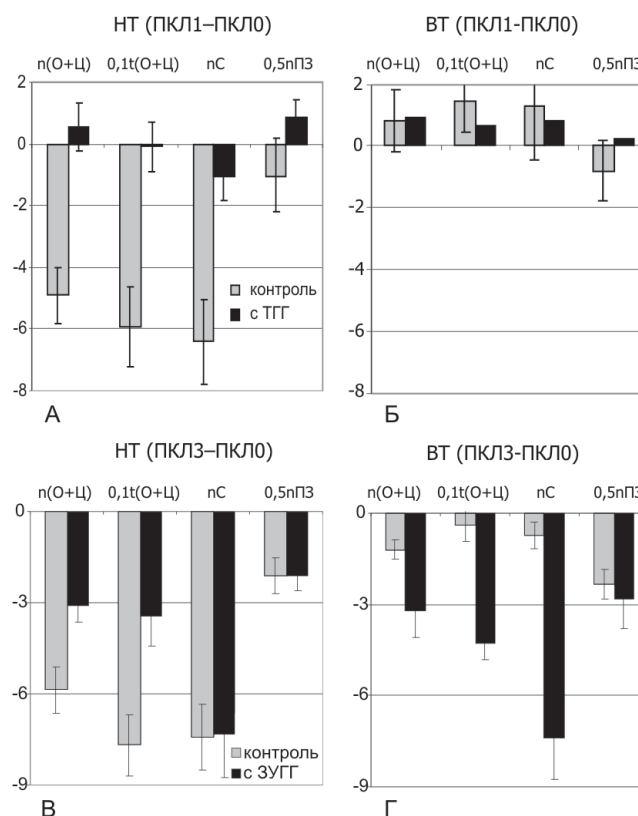


Рис. 1. Влияние различных режимов гипобарии на поведенческие характеристики животных НТ и ВТ групп.

А (Б) – реакции животных НТ (ВТ) группы на ТГГ в сравнении с контролем. В (Г) – реакции животных НТ (ВТ) группы на ЗУГГ в сравнении с контролем. На диаграммах представлены усредненные разницы между индивидуальными показателями, полученными при ретесте (ПКЛ1 – 1-суточный интервал; ПКЛ3 – 3-суточный интервал) и первичном тесте (ПКЛ0). По оси абсцисс – поведенческие характеристики: $n(O + Ц)$ – суммарное число посещений открытых рукавов и задержек в центральном участке; $0,1t(O + Ц)$ – показатель времени, потраченного на это; nC – число свешиваний; $0,5nПЗ$ – показатель числа пробежек в закрытых рукавах. Коэффициенты 0,1 и 0,5 введены для удобства масштабирования. Серые столбцы – контрольные группы, черные столбцы – группы, подвергнутые ТГГ или ЗУГГ. Данные представлены в виде $M \pm S.E.M.$; для обеих групп ПКЛ1 $n = 8-10$, для обеих групп ПКЛ3 $n = 15-22$.

Вычисление ИИП показало сохранение суточной пространственной памяти на уровне 0,7–0,6 с малодостоверным различием между НТ и ВТ группами (рис. 2, А – контроль). ТГГ почти вдвое снизила ИИП в каждой из групп, что указывает на существенный амнестический эффект ТГГ (см. рис. 2, А – ТГГ). В серии опытов с 3-суточным интервалом ИИП в контроле составлял 0,6 и 0,48 у НТ и ВТ подгрупп соответственно причем с достоверным различием (см. рис. 2, Б – контроль). ЗУГГ в обеих

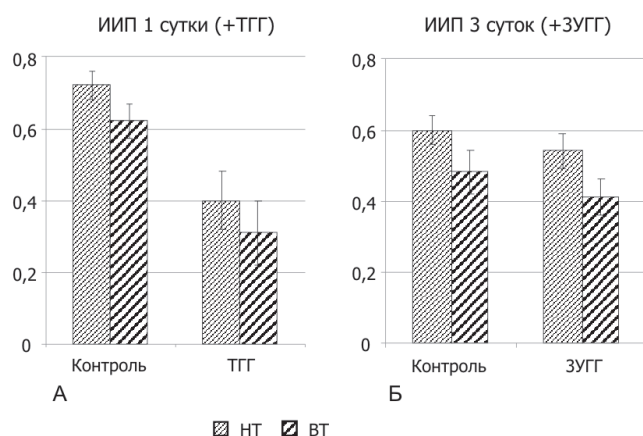


Рис. 2. Влияние различных режимов гипобарии на долговременную пространственную память животных НТ и ВТ групп.

А – влияние ТГГ (ретест 1 сут). Б – влияние ЗУГГ (ретест 3 сут). На диаграммах представлены усредненные ИИП в относительных единицах, определенные для животных группы НТ (светлая штриховка) и ВТ (темная штриховка). Данные представлены в виде $M \pm S.E.M.$; в каждой группе $n = 8-11$.

группах не создавала достоверного снижения ИИП (см. рис. 2, Б – ЗУГГ). Таким образом, по данным ТЛ-тестирования ТГГ обладала амнестическим эффектом в пределах 1-суточного ретеста, а ЗУГГ этого эффекта не проявляла даже в отношении 3-суточной памяти.

Подавляющий эффект тяжелых форм гипоксии на когнитивные функции объясняется нейродегенеративными процессами в мозговых структурах, вовлеченных в формирование памяти, прежде всего в гиппокампе [3], которые запускаются рядом патогенных реакций, одна из которых – гиперпродукция NO [21]. Отсутствие амнестического эффекта ЗУГГ может быть связано с «прокогнитивным», антиамнестическим эффектом повышенной экспрессии BDNF и активацией его рецепции в нейронах гиппокампа, показанное в различных моделях с вызванной амнезией и ее предотвращением у животных, прекоиндированных умеренной прерывистой гипоксией [7, 14, 22], в том числе ЗУГГ [23].

Выводы

1. Впервые в условиях парадигмы пКЛ-тестирования крыс показано различное воздействие тяжелой и умеренной острой гипобарической гипоксии на поведенческие характеристики, отражающие состояние тревожности; исследовательскую и локомоторную активности у животных, обладающих различной изначальной тревожностью.

2. Показано, что основной причиной этих различий выступает подавление долговременной

пространственной памяти после ТГГ и ее сохранение после ЗУГГ.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН ГП-4 (направление 63).

Список литературы

1. Malle C., Quinette P., Laisney M. et al. Working memory impairment in pilots exposed to acute hypobaric hypoxia // *Aviat., Space, and Environ. Med. Aerospace Med. Association*. 2013. V. 84. № 8. P. 773–779.
2. Nation D.A., Bondi M.W., Gayles E., Delis D.C. Mechanisms of memory dysfunction during high altitude hypoxia training in military aircrew // *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 2017. V. 23. № 1. <https://doi.org/10.1017/S1355617716000965>.
3. Zhou B., Li M., Cao X. et al. Phenylethanoid glycosides of *Pedicularis muscicola* Maxim ameliorate high altitude-induced memory impairment // *Physiol. Behav.* 2016. V. 157. P. 39–46.
4. Serrano J., Encinas J.M., Fernandez A.P. et al. Effects of acute hypobaric hypoxia on the nitric oxide system of the rat cerebral cortex: Protective role of nitric oxide inhibitors // *Neurosci.* 2006. V. 142. № 3. P. 799–808.
5. Wittner M., Riha P. Transient hypobaric hypoxia improves spatial orientation in young rats // *Physiol. Res.* 2005. V. 54. P. 335–340.
6. Zhang J.X., Chen X.Q., Du J.Z. et al. Neonatal exposure to intermittent hypoxia enhances mice performance in water maze and 8-arm radial maze tasks // *J. Neurobiol.* 2005. V. 65. № 1. P. 72–84.
7. Wang J., Zhang S., Ma H. et al. Chronic intermittent hypobaric hypoxia pretreatment ameliorates ischemia-induced cognitive dysfunction through activation of ERK1/2-CREB-BDNF pathway in anesthetized mice // *Neurochem. Res.* 2017. V. 42. № 2. P. 501–512.
8. Semenov D.G., Belyakov A.V., Glushchenko T.S. et al. Hypobaric preconditioning modifies Group I mGluRs signaling in brain cortex // *Neurochem. Res.* 2015. V. 40. № 11. P. 2200–2210.
9. Беляков А.В., Семенов Д.Г. PI3K/Akt система участвует в процессе нейропротективного прекоиндирования крыс умеренной гипобарической гипоксией // *Нейрохимия*. 2017. Т. 34. № 3. С. 209–217.
10. Belyakov A.V., Semenov D.G. PI3K/Akt system participates in process of neuroprotective preconditioning of rats by moderate hypobaric hypoxia // *Neirokhimiya*. 2017. V. 34. № 3. P. 209–217.
10. Самойлов М.О., Рыбникова Е.А. Молекулярно-клеточные и гормональные механизмы индуцированной толерантности мозга к экстремальным факторам среды // *Рос. физиол. журн. им. Сеченова*. 2012. Т. 98. № 1. С. 108–126.
10. Samoilov M.O., Rybnikova E.A. Molecular-cellular and hormone mechanisms of induced tolerance of the brain to

extremal factors of environment // Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova. 2012. V. 98. № 1. P. 108–126.

11. Самойлов М.О., Чурилова А.В., Глущенко Т.С. Морфологические отличия эффектов разных режимов preconditioning, направленных на коррекцию повреждения нейронов гиппокампа при действии тяжелой гипобарической гипоксии // Морфология. 2015. Т. 147. № 6. С. 23–27.

Samoilov M.O., Churilova A.V., Glushchenko T.S. Morphological differences between the effects of different modes of preconditioning, directed to correction of the damage of hippocampal neurons induced by severe hypobaric hypoxia // Morfologiya. 2015. V. 147. № 6. P. 23–27.

12. Vataeva L.A., Tyul'kova E.I., Samoilov M.O. Influence of severe hypoxia on rat emotional behavior: the modifying effect of preconditioning // Biological Sciences Reports. 2004. V. 395. № 1–3. P. 109–111.

13. Nade V.S., Kawale L.A., Valte K.D., Shendye N.V. Cognitive enhancing effect of angiotensin-converting enzyme inhibitors and angiotensin receptor blockers on learning and memory // Indian J. Pharmacol. 2015. V. 47. № 3 P. 263–269.

14. Hill X.L., Richeri A., Scorza C. Measure of anxiety-related behaviors and hippocampal BDNF levels associated to the amnesic effect induced by MK-801 evaluated in the modified elevated plus maze in rats // Physiol. Behav. 2015. V. 147. P. 359–363.

15. Miyazaki S., Imaizumi M., Machida H. The effects of anxiolytics and anxiogenics on evaluation of learning and memory in an elevated plus-maze test in mice // Methods Find. Exp. Clin. Pharmacol. 1995. V. 17. № 2. P. 121–127.

16. Schneider P., Ho Y.-J., Spanagel R., Pawlak C.R. A novel elevated plus-maze procedure to avoid the one-trial tolerance problem // Front. Behav. Neurosci. 2011. V. 5. URL: <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2011.00043>.

17. Семенов Д.Г., Беляков А.В. Патент РФ на ПМ №159773. Регистр. 08.06.2015.

Semenov D.G., Belyakov A.V. Patent RF for PM №159773. Registr. 08.06.2015.

18. Cohen H., Liu T., Kozlovsky N. et al. The neuropeptide Y (NPY)-ergic system is associated with behavioral resilience to stress exposure in an animal model of post-traumatic stress disorder // Neuropsychopharmacol. 2012. V. 37. P. 350–363.

19. Беляков А.В., Дудкин К.Н., Рыбникова Е.А. и др. Патент РФ № 2593345. Регистр. 11.07.2016.

Belyakov A.V., Dudkin K.N., Rybnikova E.A. et al. Patent RF № 2593345. Registr. 11.07.2016.

20. Stroeve S.A., Tjul'kova E.I., Glushchenko T.S. et al. The augmentation of brain thioredoxin-1 expression after severe

hypobaric hypoxia by the preconditioning in rats // Neurosci. Lett. 2004. V. 370. № 2–3. P. 224–229.

21. Shi Q., Liu X., Wang N. et al. 1400W ameliorates acute hypobaric hypoxia/reoxygenation-induced cognitive deficits by suppressing the induction of inducible nitric oxide synthase in rat cerebral cortex microglia // Behav. Brain Res. 2017. V. 319. P. 188–199.

22. Kushwah N., Jain V., Deep S. et al. Neuroprotective role of intermittent hypobaric hypoxia in unpredictable chronic mild stress induced depression in rats // PLOS ONE. 2016. V. 11. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149309>.

23. Баранова К.А., Рыбникова Е.А., Самойлов М.О. Нейротрофин BDNF вовлекается в формирование и предотвращение постстрессовых психопатологий // Нейрохимия. 2015. Т. 32. № 2 С. 131–139.

Baranova K.A., Rybnikova E.A., Samoilov M.O. The neurotrophin BDNF is involved in the development and prevention of stress-induced psychopathologies // Neurokhimiya. 2015. V. 32. № 2. P. 131–139.

Поступила 23.02.2018

EFFECT OF ACUTE HYPOBARIA ON RAT'S BEHAVIOR AND LONG-TIME MEMORY

Semenov D.G., Belyakov A.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 53–57

Wistar rats were put in a pressure chamber in order to assess the effects of acute hypobaric hypoxia on behavior and long-time memory with the help of paired testing in the elevated plus maze (EMP) combined with the transfer latency test. According to the EMP-retest, severe hypobaria (180 mm Hg, 3 hrs), unlike moderate hypobaria (360 mm Hg, 2 hrs, 3 times with 24-hr interval), eliminates completely the inhibitory effect on the exploratory behavior typical of initially low-anxiety rats on the background of dramatic inhibition of spatial memory. These findings infer that acute severe hypobaric hypoxia causes amnesia and breakdown of underlying habituation processes. Intermittent moderate hypoxia did not produce these effects.

Key words: behavior, spatial memory, elevated plus maze, test/retest, acute hypobaric hypoxia.

УДК 574.68,574.682,574.635

МИКРОБНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В ОРБИТАЛЬНОМ ПОЛЕТЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ФОТОН-М4»

Смирнов И.А., Ильин В.К., Тюрин-Кузьмин А.Ю., Солдатов П.Э., Шулагин Ю.А., Смоленская Т.С., Коршунов Д.В., Камнева А.И.

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

E-mail: alturkuz@mail.ru

Исследования, проведенные на борту космического аппарата «Фотон-М4», показали сохранение работоспособности микробного топливного элемента в условиях орбитального полета. Имеющиеся признаки влияния невесомости в целом не нарушали его функционирования.

Ключевые слова: микробный топливный элемент, замкнутая экосистема, сточные воды, космический полет.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 58–61.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-58-61

Для космических исследований технология микробных топливных элементов (МТЭ) может представлять интерес по следующим направлениям: 1) как альтернативный источник энергии; 2) как принципиальная основа для создания очистных сооружений будущих планетарных баз; 3) как простейшая модель замкнутой экосистемы.

Действие МТЭ основано на использовании микроорганизмов, способных окислять органические соединения, вырабатывать при этом электроны и передавать их во внешнюю среду. Первоначально МТЭ разрабатывался в 60-х, а затем в 90-х годах XX в. как альтернативный экологически чистый источник энергии [1, 2]. Хотя достигнутая удельная эффективность такого способа производства энергии пока невелика, но ведущиеся в ряде лабораторий работы позволяют в дальнейшем надеяться на ее повышение [3, 4]. С другой стороны, происходящие в МТЭ сопряженные процессы нейтрализации и разложения органических веществ, образования воды, удаления ионов тяжелых металлов и генерирования электроэнергии позволяют использовать принципы их конструирования для создания управляемых и экономичных очистных сооружений будущих планетарных баз. Однако для текущего этапа освоения космоса, пожалуй, наибольший интерес МТЭ представляет как основа простейшей модели замкнутой экосистемы, длительно существующий комплекс живых организмов, не требующий внешнего обслуживания

(единственное требование – поддержание диапазона температур в пределах 15–40 °С). Важной представляется возможность его размещения на практически любом космическом аппарате (в том числе направляемом в дальний космос) и получения информации о его состоянии с помощью наиболее просто регистрируемого электрического сигнала [5].

В качестве основы МТЭ нами была использована двухкамерная электрохимическая ячейка [1]. Она включает в себя анод и катод, помещенные каждый в свою камеру. Анодная и катодная камеры разделены протонопроводящей мембраной. Анод находится в анаэробной среде, содержащей водный раствор с ассоциацией микроорганизмов, а катод – в аэрируемой воде (рис. 1).

В анодной камере в результате жизнедеятельности микроорганизмов происходит окисление органических веществ, при этом образуются гидратированные ионы водорода и восстановленные продукты анаэробного дыхания бактерий. Если анод и катод электрически соединить через внешнее сопротивление, избыток электронов по внешней цепи потечет на катод. Одновременно с этим гидратированные ионы водорода мигрируют из анодной камеры через протонопроводящую мембрану в катодную камеру. Здесь происходит взаимодействие ионов водорода с кислородом воздуха и электронами, поступившими с анода по внешней цепи. Эта электрохимическая реакция сопровождается образованием молекул воды [1–3].

Получаемый при работе МТЭ ток достаточен, например, для питания слаботочных электронных

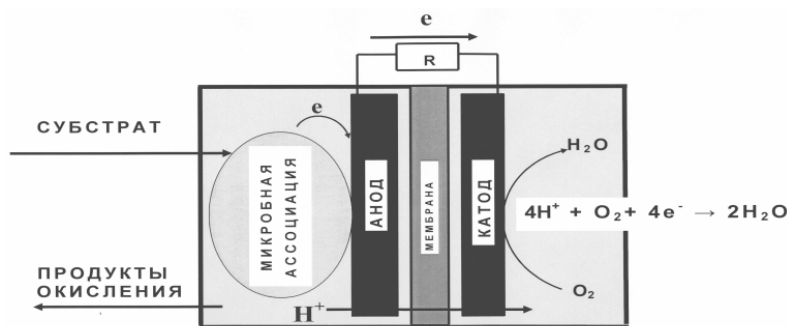


Рис. 1. Принципиальная схема электрохимической ячейки

приборов. Для космических аппаратов достоинством такого способа электроснабжения электронной техники является отсутствие необходимости согласования характеристик бортовой системы электропитания (колебания напряжения, помехи и т.д.) и измерительных приборов. Кроме того, появляется резервный источник электроэнергии. Такие устройства могут работать годами и полезны не только в космосе, но и в земных условиях для питания приборов в отдаленных и труднодоступных регионах, где смена батарей затруднена [6].

Процесс генерации электроэнергии микроорганизмами имеет отчетливо выраженные гравитационные составляющие. К ним относятся седиментационный потенциал (эффект Дорна) и тепловая конвекция. Эти явления отсутствуют в невесомости. Поэтому проведение экспериментов в условиях длительного космического полета позволит определить возможность работы МТЭ в невесомости и более полно раскрыть особенности процессов получения электричества в микробных топливных элементах.

Цель работы – создание автономной научной аппаратуры для исследования процесса генерации электричества микроорганизмами-электрогенами и отработка процесса в условиях невесомости на космическом аппарате (КА) «Фотон-М4» при длительности полета до 60 сут.

Методика

Условия космического полета (КП) накладывают на конструкцию МТЭ ряд ограничений: устройство должно работать в условиях невесомости, необходима герметичность устройства, должна быть обеспечена возможность длительной работы без перезарядки или «подкормки» (длительность функционирования КА «Фотон-М4» рассчитана на 2 мес).

Нами были разработаны принципы построения и принципиальная схема двухкамерной электрохимической ячейки, адаптированной к условиям КП. Все компоненты, необходимые для длительной работы МТЭ, заранее загружались в каждую из камер и в процессе работы не пополнялись. В качестве источника кислорода использовался воздух, заключенный в воздушную камеру, откуда поступал в катодную камеру за счет диффузии через газоселективную мембрану. После загрузки компонентов ячейки герметизировались и были полностью изолированы от окружающей среды.

На основании результатов многочисленных лабораторных испытаний было принято решение использовать в качестве микробной ассоциации активный ил. Для работы МТЭ использовали массу, полученную из активного ила, взятого на Курьяновской станции аэрации г. Москвы. С использованием для МТЭ этой иловой массы в лабораторных условиях получались хорошо воспроизводимые результаты в течение ряда лет.

Использованная иловая масса содержала микроорганизмы сточных вод [7] в среде практически пресной воды. Это устранило осложнения, связанные с осмотическими явлениями между камерами МТЭ. Использование иловой массы решило и проблему длительной работы МТЭ, поскольку микроорганизмы, по-видимому, для питания используют вещества, уже имеющиеся в иловой массе (продукты деградации микробной биомассы). Последующие экспериментальные исследования показали, что использование иловой массы сточных вод было удачным решением для снаряжения космических ячеек МТЭ.

Научная аппаратура для летных космических испытаний (ЛКИ) МТЭ-01 была изготовлена ООО НПП «БиоТехСис» (Россия) и состояла из 2 одинаковых ячеек. Конструктивно каждая электрохимическая микробная ячейка была выполнена из фторопласта и включала микробную (анодную), водную (катодную) и воздушную камеры (рис. 2). Объем микробной и водной камер составлял по 490 мл, а воздушной – 800 мл. Микробная и водная камеры были

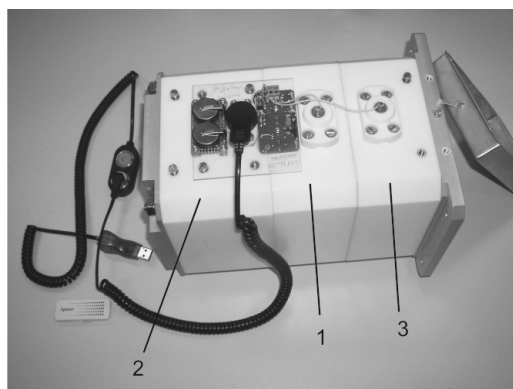


Рис. 2. Внешний вид МТЭ со стороны блока регистрации. Обозначения: 1 – водная камера; 2 – воздушная камера; 3 – микробная камера

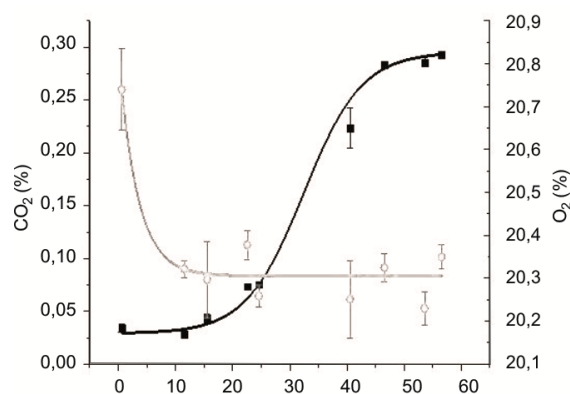


Рис. 3. Изменение содержания O₂ и CO₂ в воздушной камере МТЭ в эксперименте на Земле

Таблица

Характеристики иловой массы научной аппаратуры МТЭ

Параметры	Исходные показатели	После полета		Наземный контроль
		Ячейка № 1	Ячейка № 2	
Доза ила по объему, мл	850	880	890	800
Доза ила по весу, г/л	16	13,48	14,06	13,40
Иловый индекс, мл/г	53	65	63	59

разделены протонпроводящей мембраной МК-40 (ОАО «ЩекиноАзот», Россия) площадью 95 см², а водная и воздушная – полиэтиленовой мембраной толщиной 0,1 мм с той же площадью. Electroды в виде дисков диаметром 100 мм и толщиной 5 мм были выполнены из графита с включением меди. Вся конструкция в собранном состоянии была полностью герметична. Регистрацию температуры и напряжения между электродами осуществляли с помощью укрепленного на стенке ячейки измерительного комплекса iButton Data Logger Revisor (IBDL, версия 2,2, фирма НТЛ «ЭлИн», Россия), с частотой 1 раз в час, общее сопротивление нагрузки составляло 20 кОм. Всего в полете были задействованы 2 одинаковые ячейки.

Обе ячейки МТЭ для космического эксперимента были заправлены на космодроме и размещены на КА «Фотон-М4», полет которого по техническим причинам продолжался в течение 52 сут вместо запланированных 60. После полета ячейки были разобраны, промыты и одна из них была использована в наземном контрольном эксперименте, в котором был воспроизведен температурный профиль полета.

Результаты и обсуждение

В предварительных опытах хроматографический анализ газов в герметичной ячейке показал, что в процессе длительной работы МТЭ происходит нарастание содержания углекислого газа

и уменьшение содержания кислорода (рис. 3). Нарастание содержания CO₂ свидетельствует об электрохимическом разложении органических веществ, содержащихся в субстрате. Уменьшение содержания O₂ однозначно доказывает, что ячейка работает в режиме топливного элемента.

Характеристики иловой массы до и после КП по сравнению с контрольными значениями приведены в таблице.

Как видно из графиков (рис. 4, А и Б), электрические характеристики ячеек в условиях космического полета были практически такие же, как и в контрольном наземном эксперименте. Ячейки вырабатывали ток около 18 мкА в течение 52 сут, что в общей сложности составило около 36 Дж от каждой ячейки. Графики также показывают, что на величину напряжения МТЭ заметно влияет температура окружающей среды: чем выше температура, тем выше напряжение.

Изменения температуры позволили наглядно продемонстрировать отличия в протекании процессов на Земле и в космосе. В контрольном эксперименте ячейка МТЭ устанавливалась так, что диск микробного электрода находился снизу в горизонтальном положении и микробная масса оседала на него. Торцевая стенка, ближайшая к электроду, была наиболее тонкой и граничила с металлическим основанием МТЭ, так что изменения температуры внешней среды в первую очередь доходили до анода. В условиях Земли это, по-видимому, приводило

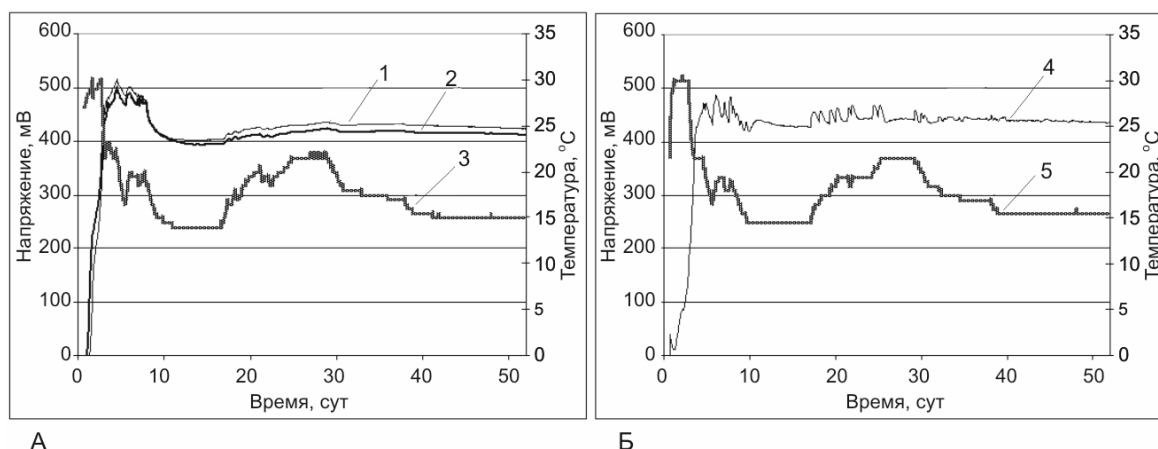


Рис. 4. Напряжение и температура в МТЭ в ходе космического и наземного экспериментов. Обозначения: А – полет; Б – наземный контроль; 1, 2, 4 – напряжение на ячейках; 3, 5 – температура

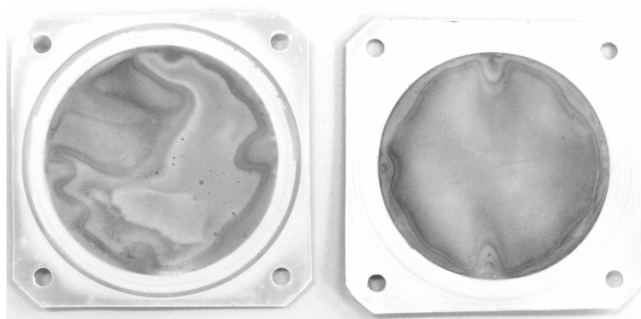


Рис. 5. Мембраны МК-40 после космического (слева) и наземного (справа) экспериментов

к конвективным потокам вблизи анода, колеблющим микробную массу на аноде, что и выразилось в виде колебаний напряжения во время изменений температуры. В периоды постоянства температуры такие колебания отсутствовали. Однако в космосе подобных колебаний напряжения не наблюдалось, хотя профиль изменения температуры контрольного эксперимента воспроизводил температурный профиль полета.

Другим отличием космического и наземного экспериментов была конфигурация на мембране отпечатков прилегающей к ней микробной массы с большей или меньшей плотностью. В ячейке, вскрытой сразу после полета, четко видны неоднородные концентрические волнообразные фигуры. Мембрана ячейки в условиях контрольного наземного эксперимента была окрашена более однородно (рис. 5).

Таким образом, лётно-космическое испытание научной аппаратуры МТЭ-01 на борту КА «Фотон-М4» прошло успешно и показало правильность выбранных научно-технологических решений, а также перспективность разработки для дальнейших космических исследований. В настоящее время проводится разработка и подготовка модифицированного блока МТЭ-02 к полету КА «Бион-М2».

Выводы

1. Показана жизнеспособность замкнутой экосистемы на основе МТЭ в условиях невесомости, что позволяет развивать ее дальнейшее применение в условиях КП.

2. Наблюдаемые различия в функционировании МТЭ в космическом и наземном экспериментах обусловлены влиянием гравитации, но они не препятствуют генерации электроэнергии микроорганизмами.

Работы выполнены в рамках договора между ГНЦ РФ – ИМБП РАН и ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ ПРОГРЕСС» № 11-16-436 от 11.01.2011 г. и по программе фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН.

Список литературы

1. Logan B.E. Microbial fuel cells, Wiley-interscience. 2007.
2. Дебабов В.Г. Производство электричества микроорганизмами // Микробиология. 2008. Т. 77. № 2. С. 149–157.
3. Debabov V.G. Production of electricity by microorganisms // Mikrobiologiya. 2008. V. 77. № 2. P. 149–157.
4. Microbial electrochemical and fuel cells fundamentals and applications / K. Scott, Hao Yu, eds. 2016.
5. Microbial fuel cell. A bioelectrochemical system that converts waste to Watts / Debabrata Das, ed. New Delhi, India, 2018.
6. Тюрин-Кузьмин А.Ю., Смирнов И.А. Перспективы применения микробных топливных элементов в исследовании космоса // XVI конф. по косм. биологии и медицине. М., 2016. С. 237–238.
7. Tyurin-Kuzmin A. Yu., Smirnov I.A. Prospects of application of microbial fuel cells in space exploration // XVI conference on space biology and medicine. Moscow, 2016. P. 237–238.
8. Ильин В.К., Смирнов И.А., Солдатов П.Э. и др. Микробные топливные элементы как альтернативные источники электрического тока // Авиакосм. и экол. мед. 2012. Т. 46. № 1. С. 62–67.
9. Ilyin V.K., Smirnov I.A., Soldatov P.E. et al. Microbial fuel cells as an alternative power supply // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2012. V. 46. № 1. P. 62–67.
10. Тюрин-Кузьмин А.Ю., Коршунов Д.В., Пунегова А.В. и др. Микробный топливный элемент как модель флоккулы – структурно-функциональной единицы активного ила // Технологии живых систем. 2017. Т. 14. № 3. С. 42–47.
11. Tyurin-Kuzmin A. Yu., Korshunov D.V., Punegova A.V. et al. Microbial fuel cell as of the model of floccule – structurally functional unit of activated sludge // Tekhnologii zhivyyh system. 2017. V. 14. № 3. P. 42–47.

Поступила 06.03.2018

MICROBIAL FUEL CELL IN THE ORBITAL FLIGHT OF SPACECRAFT «FOTON-M4»

Smirnov I.A., Ilyin V.K., Tyurin-Kuzmin A.Yu., Soldatov P.E., Shulaguin Yu.A., Smolenskaya T.S., Korshunov D.V., Kamneva A.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 58–61

Investigations aboard spacecraft «Foton-M4» evidenced stable functionality of the microbial fuel cell during orbital flight despite some indications of microgravity impacts.

Key words: microbial fuel cell, closed eco-system, waste water, space flight.

УДК 629.786+543.26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ УСКОРЕННОГО ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ, ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ ПИЛОТИРУЕМЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Озеров Д.С.¹, Мухамедиева Л.Н.¹, Баринов В.А.², Сидорин Г.И.²

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

²Институт токсикологии Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург

E-mail: ozerov@imbp.ru

Разработана математическая модель расчета гигиенических нормативов ($ОБУВ_{ПКА}$) для высокотоксичных химических веществ в воздухе пилотируемых космических аппаратов. Обоснование математической модели расчетного метода проведено в экспериментах на лабораторных животных, моделирующих общетоксическое действие веществ, на примере 1,2-дихлорэтана. Оценка биоэффекта проводилась по результатам биохимических, функциональных (выносливость) и патоморфологических исследований, характеризующих гепатотоксическое, нейро- и нефротоксическое действие вещества при круглосуточном воздействии в течение 120 сут. Экспериментально установлены пороговая ($2,0 \text{ мг/м}^3$) и недействующая ($0,5 \text{ мг/м}^3$) концентрации 1,2-дихлорэтана. Различие в величинах экспериментально обоснованных пороговой и недействующей концентрации 1,2-дихлорэтана и расчетных величин $ОБУВ_{ПКА}$ не превышает 3 раз, что подтверждает надежность установленных математических зависимостей.

Для подтверждения надежности формул были рассчитаны $ОБУВ_{ПКА}$ для 13 высокотоксичных веществ различных классов и проведен сравнительный анализ расчетных $ОБУВ_{ПКА}$ с экспериментально установленными их величинами $ПДК_{ПКА}$ указанными в ГОСТ Р 50804-95. Коэффициент корреляции между расчетными $ОБУВ_{ПКА}$ и экспериментальными $ПДК_{ПКА}$ составил 0,74 ($p < 0,01$), что подтверждает надежность установленных математических зависимостей и позволяет рекомендовать разработанные формулы расчета ускоренного нормирования высокотоксичных веществ в практике космической токсикологии.

Ключевые слова: пилотируемые орбитальные станции, загрязнения воздушной среды, ускоренное гигиеническое нормирование, предельно допустимые концентрации, эксперименты с лабораторными животными.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 62–69.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-62-69

Многолетние исследования состава химических веществ в воздушной среде орбитальных станций (ОС) показали, что с увеличением длительности функционирования перечень загрязнителей

воздуха ОС пополняется новыми соединениями [1, 2]. Среди ранее неидентифицируемых соединений выявляются умеренно токсичные и высокотоксичные вещества, в том числе 2-го класса опасности, для которых отсутствуют экспериментально обоснованные предельно допустимые концентрации в воздухе пилотируемых космических аппаратов ($ПДК_{ПКА}$) на определенные сроки полета. Экспериментальное обоснование $ПДК_{ПКА}$ вновь детектированных веществ является длительной и затратной задачей. В этой связи возрастает актуальность разработки методов ускоренной оценки безопасных уровней воздействия ксенобиотиков на человека в условиях длительного космического полета.

Математическое моделирование параметров токсичности и ориентировочных безопасных уровней воздействия ($ОБУВ$) уже давно является существенным звеном прогнозирования величин токсических доз и концентраций в однократном и хроническом эксперименте. В то же время математическое моделирование является конечным этапом при расчете величин безопасных уровней воздействия [3, 4]. При моделировании $ОБУВ$ более значимыми по сравнению с физическими и физико-химическими константами являются параметры токсичности однократного действия [5, 6].

Целью исследований являлось экспериментальное подтверждение надежности разработанного ускоренного (расчетного) метода гигиенического нормирования веществ 2-го класса опасности, загрязняющих воздушную среду орбитальных станций, на примере 1,2-дихлорэтана (табл. 1).

Измеренные концентрации 1,2-дихлорэтана (далее – дихлорэтан) постоянно идентифицируются и имеют логнормальное распределение в воздушной среде Международной космической станции (МКС), а среднеарифметическое значение соответствует 70-му перцентилю распределения.

В задачи исследований входили:

1. Разработка $ОБУВ_{ПКА}$ для дихлорэтана с использованием расчетного метода.

Таблица 1

Физико-химические свойства 1,2-дихлорэтана

Химическая формула	$C_2H_4Cl_2$
Молекулярная масса	98,96 а.е.м.
Температура плавления	-35 °С
Температура кипения	83 °С
Растворимость в воде при н.у.	Плохо растворим 0,87 г/ 100 мл
Плотность при 25 °С	1,253 г/мл

2. Обоснование недействующей и пороговой концентраций дихлорэтана в экспериментах на белых крысах с хроническим ингаляционным действием ксенобиотика.

3. Проведение сравнительного анализа величин экспериментально обоснованной недействующей концентрации дихлорэтана и расчетной ОБУВ_{ПКА} дихлорэтана для пилотируемых космических аппаратов.

Методика

Установление ОБУВ_{ПКА} дихлорэтана с использованием расчетного метода

Формулы расчета ОБУВ_{ПКА} были получены в виде уравнений прямолинейной регрессии корреляционно-регрессионным анализом между ПДК_{Р.З.} и ПДК_{А.В./} с одной стороны, и ПДК_{ПКА} – с другой. Для повышения точности расчетных формул, учитывался класс опасности и лимитирующей фактор вредности [7, 8].

Установление недействующей и пороговой концентраций дихлорэтана в эксперименте на лабораторных животных

Ингаляционное воздействие 1,2-дихлорэтана проводили на 120 половозрелых крысах-самцах линии Вистар с исходной массой 150–180 г. Эксперименты проводились в 800-литровых герметичных камерах стендовой базы ГНЦ РФ – ИМБП РАН, снабженных системами жизнеобеспечения и в соответствии с МУ 2163-80 и МУ № 4681-88 [9, 10]. Поддержание заданных концентраций дихлорэтана (10,0; 2,0 и 0,5 мг/м³) в камерах осуществляли динамическим способом (круглосуточно) в течение хронического эксперимента продолжительностью 120 сут, регулируя скорость подачи чистого воздуха и исследуемого вещества. Концентрации 1,2-дихлорэтана в гермокамере определяли 2 раза в сутки. В процессе эксперимента концентрации составили $10,7 \pm 0,2$; $2,1 \pm 0,05$ и $0,5 \pm 0,02$ мг/м³. Пробы воздуха отбирали из гермокамеры с помощью газового шприца. Полученные газовые пробы анализировали методом ГХ-МС (GC6890+ с масс-спектрометрическим детектором Agilent Technologies, США). Расшифровку хроматограмм, идентификацию органических веществ и количественную оценку их

в анализируемых пробах проводили с использованием компьютерной техники. Определение содержания вещества в воздухе гермокамер осуществляли методом газовой хроматографии ГОСТ Р ИСО 16000 («Воздух замкнутых помещений». Часть 6). Для оперативного анализа аммиака и углекислого газа использовали линейно-колористический метод (индикаторные трубки фирмы Draeger). Содержание кислорода определяли с помощью газоанализатора «Гамма-100».

Проявления общей токсичности при воздействии дихлорэтана оценивали по динамике массы тела, нейротоксичность – по изменению ориентировочной реакции [11], гепатотоксичность – по индикаторному клеточному ферменту активности фруктозо-1,6-дифосфат альдозлазы сыворотки крови [12]. Детоксикационную функцию печени оценивали по выведению гиппуровой кислоты с мочой и продолжительности «гексеналового сна», нефротоксичность – по спонтанному диурезу и содержанию хлоридов и белка в моче [13]. Морфологические исследования печени проводили по общепринятым методикам [14]. Для оценки сохранения работоспособности лабораторных животных после воздействия дихлорэтаном сравнивали продолжительность бега на тредбане у крыс экспериментальных и контрольной групп.

Динамику «прореагировавших» показателей, характеризующих состояние конкретного органа-мишени, исследовали в хронических (120-суточных) экспериментах, моделируя круглосуточное ингаляционное воздействие. Токсичность дихлорэтана оценивали по принципу порогового действия на организм экспериментальных животных при его воздействии в концентрациях 0,5; 2,0 и 10,0 мг/м³. Выбор экспериментальных концентраций основывался на показателях острой токсичности, физико-химических свойств вещества и расчетного определения порога рефлекторного действия [15].

Все исследования были проведены в строгом соответствии с основными биоэтическими правилами лабораторной практики в Российской Федерации и требованиями Всемирного общества защиты животных (WSPA). Программа исследований была рассмотрена Комиссией по биомедицинской этике Института медико-биологических проблем РАН и

Таблица 2

Изменение физиологических и биохимических показателей лабораторных животных при хроническом воздействии дихлорэтана в исследованных концентрациях

Исследованные показатели		Концентрация дихлорэтана			
		Контроль	0,5 мг/м³	2,0 мг/м³	10,0 мг/м³
Общее состояние и нагрузочные тесты	Динамика веса тела (в граммах)	181 ± 11	166 ± 8	169 ± 6	159 ± 7*
	Бег на тредбане 120 сут (в мин)	16,2 ± 2,3	15,3 ± 1,8	17,2 ± 1,4	9,8 ± 1,1*
Нейро-токсичность	Динамика ориентировочной реакции 120 сут (число «заглядываний» в % к контролю)	100 ± 14	104 ± 17,0	55 ± 11,0*	3 ± 6,0*
Гепато-токсичность	Активность альдолазы в крови (МЕ/л)	6,2 ± 0,2	6,1 ± 0,3	6,3 ± 0,1	7,6 ± 0,3*
	Содержание гиппуровой кислоты в моче на 120-е сутки воздействия (мг/сут)	162 ± 3,4	98 ± 13,7	110 ± 12,7	134 ± 8,5*
Нефро-токсичность	Спонтанный диурез (кол-во мочи мл/сут)	10,9 ± 1,6	8,7 ± 1,3	8,3 ± 1,4	5,1 ± 0,7*
	Белок в моче (‰)	0,5 ± 0,12	0,8 ± 0,25	0,5 ± 0,13	1,23 ± 0,3*
	Хлориды в моче (мг/мл)	2,4 ± 0,27	2,1 ± 0,18	1,9 ± 0,23	1,6 ± 0,24*

Примечание. * – достоверное изменение показателя по сравнению с контрольной группой при $p < 0,05$.

признана соответствующей международным нормам биоэтики (протокол № 136 от 02.06.2010).

Использование минимального количества животных одной линии, пола и возраста было достаточным для получения статистически достоверных результатов. Содержание, питание, уход за животными и выведение их из эксперимента проводили в соответствии с требованиями «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных» (приказ Минздрава России от 19.06.2003 № 267). Эвтаназию крыс осуществляли путем декапитации гильотиной. Забор биоматериала осуществлялся после декапитации без использования наркотических препаратов.

Результаты и обсуждение

Методические подходы к разработке расчетных значений ОБУВ_{ПКА} для веществ 2-го класса опасности по резорбтивному действию. Общая зависимость между ПДК_{р.з.} – ПДК_{ПКА} представлена на рис. 1 и описывается формулой

$$\lg \text{ПДК}_{\text{ПКА}} = 0,75 \lg \text{ПДК}_{\text{р.з.}} - 0,85 \quad (1)$$

В связи с тем что любая математическая формула позволяет рассчитать наиболее точно средние данные по вариационному ряду, применение

формулы (1) (общей зависимости нормативов без учета их класса опасности) для веществ 1-го класса опасности завышает прогнозные уровни, а для веществ 4-го класса – занижает. Более точные прогнозы будут давать уравнения, учитывающие класс опасности вещества и лимитирующий показатель вредности (рефлекторное, резорбтивное и рефлекторно-резорбтивное), поскольку в этом случае

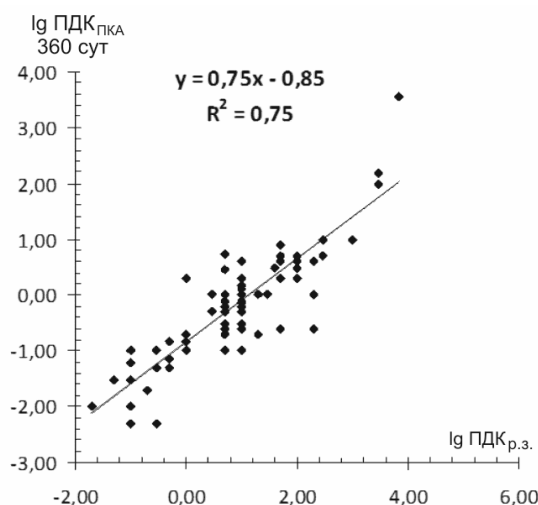


Рис. 1. Взаимосвязь ПДК_{ПКА} (360 сут) и ПДК_{р.з.} ($n = 92$; $r = 0,87$)

Таблица 3

Динамика активности альдолазы (МЕ/л) в сыворотке крови крыс (n = 10) при воздействии дихлорэтана в изученных концентрациях

Концентрация дихлорэтана, мг/м ³	Сутки эксперимента								
	Фон	15-е	30-е	45-е	60-е	80-е	95-е	110-е	120-е
0,5	6,3 ± 0,1	6,4 ± 0,1	7,3 ± 0,2*	5,5 ± 0,1	5,6 ± 0,3	4,6 ± 0,2	7,0 ± 0,2*	5,2 ± 0,1	6,1 ± 0,3
2,0	6,3 ± 0,1	6,4 ± 0,3	7,2 ± 0,2*	6,6 ± 0,2*	5,6 ± 0,1	4,5 ± 0,1	7,0 ± 0,2*	5,4 ± 0,1	6,3 ± 0,1
10,0	6,3 ± 0,1	5,9 ± 0,3	6,9 ± 0,1*	6,1 ± 0,3*	5,4 ± 0,2	4,4 ± 0,3	6,9 ± 0,1*	6,2 ± 0,2*	7,6 ± 0,3*
Контроль	6,3 ± 0,2	6,4 ± 0,1	5,0 ± 0,1	5,4 ± 0,2	5,3 ± 0,3	4,7 ± 0,1	4,5 ± 0,2	5,5 ± 0,2	6,2 ± 0,2

Примечание. * – достоверное изменение показателя по сравнению с контрольной группой при p < 0,05.

отмечается более равномерное распределение показателей в исследуемом диапазоне [3].

Так, для веществ 2-го класса опасности зависимость между ПДК_{Р.З.} – ПДК_{ПКА} описывается формулой

$$\lg \text{ПДК}_{\text{ПКА}} = 0,80 \lg \text{ПДК}_{\text{Р.З.}} - 0,80 \quad (2)$$

Расчетная величина ОБУВ_{ПКА} 1,2-дихлорэтана, полученная с использованием вышеприведенных формул, составила 1,6 мг/м³.

Экспериментальное обоснование недействующей и пороговой концентраций дихлорэтана

Результаты физиологических и биохимических исследований лабораторных животных при хроническом ингаляционном воздействии дихлорэтана, представлены в табл. 2.

Масса тела животных является высокочувствительным интегральным показателем, указывающим на неблагоприятное воздействие химического вещества в хронических токсикологических экспериментах [13]. Отставание в приросте массы тела у всех экспериментальных животных наблюдалось при воздействии изученных концентраций ксенобиотика. Однако статистически значимое (p < 0,05) снижение массы по сравнению с контролем наблюдалось только у группы крыс, подвергавшихся воздействию дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³, которое сохранялось к 15-м суткам восстановительного периода. Динамика массы животных после воздействия дихлорэтана в концентрациях 0,5 и 2,0 мг/м³ соответствовала значениям контрольных животных.

Оценка нейротоксичности

Нейротоксический эффект дихлорэтана оценивали по динамике ориентировочной реакции (подсчитывали число «заглядываний в норки» в % по отношению к контрольной группе). Динамику ориентировочной реакции оценивали на 60-е и 120-е сутки эксперимента, а также на 30-е сутки восстановительного периода. К 60-м суткам воздействия дихлорэтана значимой динамики в изменении

ориентировочно-исследовательских реакций у экспериментальных групп животных по сравнению с контролем не наблюдалось. Однако к 120-м суткам эксперимента установлено достоверное (p < 0,05) уменьшение количества «заглядываний» у животных при воздействии дихлорэтана в концентрациях 2 и 10 мг/м³, более выраженное при воздействии дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³, свидетельствующее об угнетении ориентировочно-исследовательской реакции у животных и нейротоксическом эффекте токсиканта с преобладанием процессов торможения ЦНС. Ориентировочно-исследовательские реакции у животных при воздействии дихлорэтана в концентрации 0,5 мг/м³, на протяжении всего эксперимента были в пределах значений группы контроля.

Гепатотоксичность дихлорэтана

Функциональное состояние печени оценивали по показателям детоксикационной функции печени (скорость образования гиппуровой кислоты после введения в организм бензоата натрия) и цитотоксического действия дихлорэтана на ткань печени по активности индикаторного клеточного фермента фруктозо-1,6-дифосфат альдолазы сыворотки крови (табл. 3).

Цитолитическое действие дихлорэтана в изученных концентрациях определялось достоверным увеличением альдолазы в сыворотке крови животных на 30-е и 95-е сутки эксперимента. К 110-м суткам воздействия дихлорэтана наблюдалось снижение содержания альдолазы в сыворотке крови крыс, более выраженное в группе после воздействия дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³. К 120-м суткам воздействия дихлорэтана динамика фермента была различной. Так, на фоне стабилизации содержания фермента при концентрациях 0,5 и 2,0 мг/м³ в группе животных при воздействии 10 мг/м³ дихлорэтана наблюдалось достоверное (p < 0,05) увеличение содержания фермента, которое сохранялась к 15-м суткам после окончания воздействия ксенобиотика. Фазный характер динамики фермента при воздействии на организм

Таблица 4

Динамика содержания гиппуровой кислоты в моче крыс при хроническом воздействии дихлорэтана (мг/сут)

Концентрация дихлорэтана, мг/м ³	Сутки эксперимента								
	Фон	15-е	30-е	45-е	60-е	80-е	95-е	110-е	120-е
0,5	92,6 ± 0,57	106,0 ± 8,3	117,9 ± 6,5*	198,2 ± 5,1	170,0 ± 5,4	122,5 ± 8,7	146,7 ± 10,7	151,3 ± 2,3	98,4 ± 13,7*
2,0	70,0 ± 1,1	85,0 ± 10,4*	108,0 ± 9,8*	219,6 ± 12,2	164,0 ± 10,5	135,3 ± 7,4	151,4 ± 3,7	147,7 ± 8,0	109,8 ± 12,7*
10,0	85,0 ± 4,8	96,0 ± 4,5	188,3 ± 6,9	229,2 ± 12,8	167,0 ± 8,4	143,6 ± 8,7	107,0 ± 4,4*	105,0 ± 0,2*	134,4 ± 8,5*
Контроль	89,9 ± 6,4	118,0 ± 9,4	178,0 ± 6,9	270,0 ± 9,4	167,3 ± 8,7	125,5 ± 5,1	145,8 ± 8,7	141,0 ± 6,5	162,2 ± 3,4

Примечание. * – достоверное изменение показателя по сравнению с контрольной группой при $p < 0,05$.

животных дихлорэтана в изученных концентрациях свидетельствует о метаболических нарушениях и выходе фермента в кровяное русло из поврежденных участков печени или тканей на фоне продолжающегося их биосинтеза в поврежденных тканях [16]. Стабилизация активности альдолазы к 120-м суткам эксперимента при воздействии дихлорэтана в концентрациях 0,5 и 2,0 мг/м³ свидетельствует о развитии компенсаторных реакций организма животных к воздействию химического вещества.

Антиоксическая функция печени исследовалась с использованием теста «гексеналовый сон», характеризующего влияние ингаляционного действия вещества на активность монооксидазной ферментной системы гепатоцитов при биотрансформации ксенобиотика. Длительность сна экспериментальных крыс оценивалась на 120-е сутки хронического воздействия. Воздействие дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³ вызывало достоверное ($p < 0,05$) увеличение продолжительности сна до 180 ± 14 мин против $128 \pm 5,5$ мин у контрольной группы, свидетельствуя об угнетении НАДФН-зависимой монооксигеназной системы печени и, следовательно, снижении антиоксической функции печени [16]. Хроническое воздействие вещества в концентрациях 0,5 и 2,0 мг/м³ не сказалось на продолжительности «гексеналового сна» животных и практически соответствовало значениям контрольной группы.

Обезвреживающая функция печени исследовалась по тесту на синтез гиппуровой кислоты (проба Квика – Пытеля). Хроническое воздействие дихлорэтана характеризовалось фазными изменениями показателя (табл. 4).

Так, в первые 30–45 сут воздействия дихлорэтана в концентрациях 0,5 и 2,0 мг/м³ отмечалось значимое (до 50 %) увеличение содержания гиппуровой кислоты в моче по сравнению с контрольной группой животных после нагрузки бензойнокислым натрием. Однако при увеличении (до 90–120 сут) длительности хронической интоксикации

дихлорэтаном достоверное снижение синтетической функции печени наблюдалось только при воздействии ксенобиотика в концентрации 10 мг/м³.

Оценка нефротоксичности

Признаки нефротоксичности дихлорэтана регистрировались при его воздействии в концентрации 10 мг/м³ и характеризовались существенным уменьшением спонтанного диуреза у экспериментальных животных на 30-е и 75-е сутки эксперимента со стойким увеличением выделения белка с мочой, которое сохранялась до 75 сут воздействия токсиканта (см. табл. 2). Стабилизация эффекта по мере увеличения длительности воздействия свидетельствовала о нарушении фильтрационной функции почек в результате повреждения почечных канальцев после хронического воздействия дихлорэтана. При определении хлоридов в моче были обнаружены отчетливые фазные нарушения функции почек у экспериментальных животных. Так, при 30-суточной интоксикации животных дихлорэтаном в концентрации 10 мг/м³ у крыс в моче наблюдалось уменьшение содержания хлоридов, которое сохранялось до 75 сут эксперимента. Затем количество хлоридов в моче возрастало, а к 120-м суткам эксперимента наблюдалась нормализация показателя. У крыс, подвергавшихся действию дихлорэтана в концентрациях 2,0 и 0,5 мг/м³, исследованные показатели были в пределах физиологических колебаний и соответствовали значениям контрольной группы животных. Таким образом, по показателям нефротоксичности концентрация дихлорэтана 10 мг/м³ является действующей, в то время как изменения показателей при воздействии дихлорэтана в концентрации 2,0 и 0,5 мг/м³ были характерны для компенсаторных реакций организма.

Выносливость животных к физической нагрузке

На 120-е сутки воздействия дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³ выносливость животных к

физической нагрузке (бег на тротуаре) достоверно снижалась до 9,8 мин по сравнению с 16,2 мин у контрольных крыс. Воздействие дихлорэтана в концентрациях 2,0 и 0,5 мг/м³ не оказало влияния на выносливость животных к физической работе и не отличалась от показателей, наблюдаемых у контрольных животных.

Результаты патоморфологического исследования печени

120-суточное воздействие дихлорэтана в концентрациях 10 и 2 мг/м³ приводило к развитию резорбтивного токсического эффекта, который характеризовался умеренным полнокровием сосудов печени, деструктивными нарушениями в органе, характеризующимся снижением содержания в клетках гликогена и появлением в них липидных капель (рис. 2), более выраженных при воздействии дихлорэтана в концентрации 10 мг/м³. Морфологическое строение и гистологическая структура печени животных, перенесших хроническое ингаляционное воздействие дихлорэтана в концентрации 0,5 мг/м³, не отличалось от контрольной группы крыс.

Таким образом, экспериментально обоснованы токсикологически значимые концентрации дихлорэтана при хроническом 120-суточном ингаляционном воздействии на белых крыс линии Вистар. Отсутствие статистически достоверных данных по сравнению с контрольной группой по показателям, характеризующим нейротоксическое, гепатотропное, нефротоксическое действие и сохранение выносливости животных к физической нагрузке, позволило классифицировать концентрацию 0,5 мг/м³ как недействующую. Концентрация дихлорэтана 2,0 мг/м³ вызвала у животных достоверные ($p < 0,05$) изменения ориентировочной реакции, а также кратковременные недостоверные ($p > 0,05$), в пределах контрольной группы, изменения в показателях, характеризующих нефротоксичность токсиканта. С учетом результатов патоморфологических исследований печени в виде уменьшения содержания гликогена в части печеночных клеток концентрацию дихлорэтана 2 мг/м³ следует расценивать как пороговую. По показателям нефро-, гепато- и цитотоксичности установлены неблагоприятные эффекты вещества в концентрации 10 мг/м³.

Принимая во внимание отсутствие достоверных изменений при ингаляционном воздействии дихлорэтана в концентрации 0,5 мг/м³, а также слабо выраженные видовые различия токсичности вещества и относительно быстрое выведение из организма как в неизменном виде, так и в виде продуктов биотрансформации считаем возможным при обосновании ПДК_{ПКА} не применять коэффициент запаса и рекомендовать ПДК_{ПКА} для орбитальной станции на уровне недействующей концентрации – 0,5 мг/м³. Значение расчетной ОБУВ_{ПКА} дихлорэтана

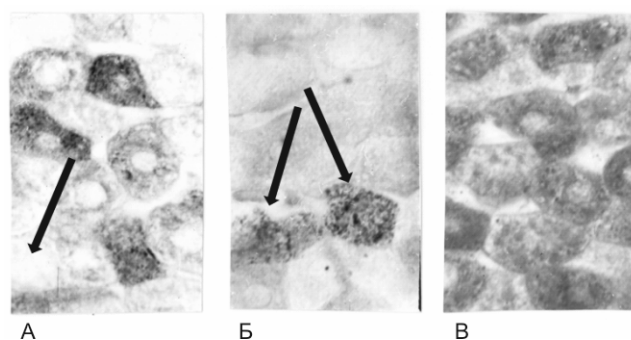


Рис. 2. Патоморфология печени крыс после 120 сут хронического воздействия дихлорэтана.

А – при концентрации 2 мг/м³ отмечается уменьшение и исчезновение гликогена из ряда печеночных клеток; Б – концентрация 10 мг/м³; только 2 печеночные клетки в поле зрения микроскопа содержат гликоген; В – контрольная группа

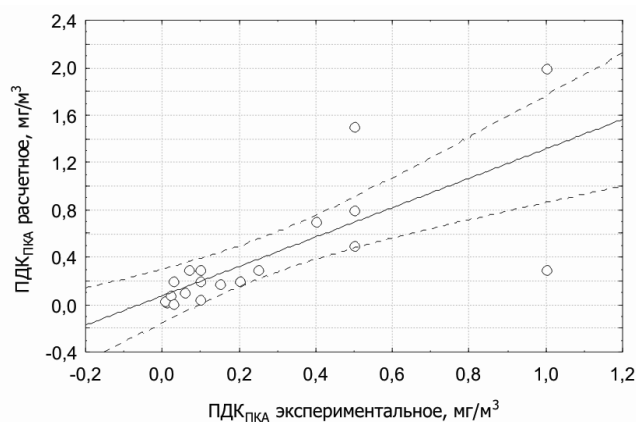


Рис. 3. Характеристика связи между экспериментально обоснованными и расчетными величинами ПДК_{ПКА}

(1,6 мг/м³) в 3 раза отличается от экспериментально установленной (0,5 мг/м³).

Для подтверждения надежности полученных формул были рассчитаны ОБУВ_{ПКА} для 13 веществ 2-го класса опасности и проведен сравнительный анализ расчетных ОБУВ_{ПКА} с экспериментально установленными величинами ПДК_{ПКА} (из ГОСТ Р 50804-95). Коэффициент корреляции между расчетными ОБУВ_{ПКА} и экспериментальными ПДК_{ПКА} составил $r = 0,74$ при $p < 0,01$ (рис. 3), что подтверждает надежность установленных математических зависимостей [15] и позволяет рекомендовать разработанные формулы расчета для ускоренного нормирования высокотоксичных веществ в практике космической токсикологии.

Выводы

1. Экспериментально при моделировании общетоксического действия 1,2-дихлорэтана с

установлением пороговой и недействующей концентраций разработана математическая модель оценки общетоксического действия высокотоксичных веществ.

2. Показано, что различие в величинах экспериментально обоснованных пороговой и недействующей концентрации 1,2-дихлорэтана и расчетных величин ОБУВ_{ПКА} не превышает 3 раз, что подтверждает надежность установленных математических зависимостей.

3. Сравнительным анализом расчетных ОБУВ_{ПКА} и экспериментально установленных ПДК_{ПКА} различных классов химических соединений, указанных в ГОСТ Р 50804-95, установлено, что коэффициент корреляции между расчетными ОБУВ_{ПКА} и экспериментальными ПДК_{ПКА} соответствующих веществ составил 0,74 ($p < 0,01$), что подтверждает надежность установленных математических зависимостей и позволяет рекомендовать разработанные формулы расчета для ускоренного нормирования высокотоксичных веществ в практике космической токсикологии.

Работы проведены с рамках государственного контракта с Федеральным медико-биологическим агентством (ФМБА России) № 20.012.10.0 от 14.05.2010.

Список литературы

1. Пахомова А.А., Озеров Д.С., Царьков Д.С. и др. Мониторинг, особенности формирования и гигиеническая характеристика состава химических веществ в воздушной среде Международной космической станции // *Авиакосм. и экол. мед.* 2017. Т. 51. № 1. С. 58–64.
Pakhomova A.A., Ozerov D.S., Tsarkov D.S. et al. Description of the chemical make-up of air on the International Space Station // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2017. V. 51. № 1. P. 58–64.
2. Озеров Д.С., Носовский А.М., Мухамедиева Л.Н. и др. Статистические закономерности распределения концентраций вредных веществ в воздухе пилотируемых орбитальных станций // *Косм. техника и технологии.* 2016. № 1 (12). С. 104–111.
Ozerov D.S., Nosovsky A.M., Mukhamedieva L.N. et al. Statistical patterns of contaminants distribution in the atmosphere of manned space stations // *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii.* 2016. № 1 (12). P. 104–111.
3. Дворкин Э.А., Люблина Е.И., Сидорин Г.И. Математическое моделирование параметров токсичности ОБУВ в разных средах // *Актуальные проблемы гигиенической токсикологии: Сб. науч. работ / А.Я. Дударев, ред. М., 1980. С. 19–33.*
Dvorkin E.A., Lyublina E.I., Sidorin G.I. Mathematical modeling of toxicity parameters in different environments // *Actual problems of hygienic toxicology: Collection of scientific works / A.Ya. Dudarev, ed. Moscow, 1980. P. 19–33.*
4. Люблина Е.И., Михеев М.И., Дворкин Э.А., Сидорин Г.И. Возможности расчета ОБУВ органических веществ по доступным физико-химическим константам и параметрам острой токсичности // *Некоторые вопросы экспериментальной промышленной токсикологии: Сб. науч. работ / М.И. Михеев, ред. М., 1977. С. 28–44.*
Lyublina E.I., Mikheev M.I., Dvorkin E.A., Sidorin G.I. Possibilities for calculating of permissible concentrations of organic substances depending on accessible physicochemical constants and parameters of acute toxicity // *Some questions of experimental industrial toxicology: Collection of scientific works / M.I. Mikheev, ed. Moscow, 1977. P. 28–44.*
5. Смирнов В.Г. Комплексное эколого-токсикологическое регламентирование химических веществ в объектах окружающей среды: Дис. ... докт. биол. наук. СПб., 2003.
Smirnov V.G. Integrated environmental-toxicological regulation of chemicals in environmental objects: *Dissertatsiya ... doktora biologicheskikh nauk.* St. Petersburg, 2003.
6. Тепикина Л.А. Научно-методические основы ускоренной оценки токсичности и опасности веществ, загрязняющих атмосферный воздух: Автореф. дис. ... докт. мед. наук. М., 2007.
Tepikina L.A. Scientific and methodological basis for the accelerated assessment of toxicity and hazard of substances polluting the atmospheric air: *Avtoreferat dissertatsii ... doktora meditsinskikh nauk.* Moscow, 2007.
7. ГН 2.1.6.1338-03 «Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха, предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
Russian State Standards 2.1.6.1338-03 «Maximum permissible concentrations (MPC) of air pollutants in populated areas».
8. ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».
Russian State Standards 2.2.5.1313-03 «Maximum allowable concentrations (MAC) of hazardous substances in the air of working area».
9. МУ 2163-80 «Методические указания к постановке исследований для обоснования санитарных стандартов вредных веществ в воздухе рабочей зоны».
Guidelines 2163-80 «Methodical instructions for setting sanitary standards of chemical pollutants in the air of the work area».
10. Временные методические указания (№ 4681-88) по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
Temporary guidelines (№ 4681-88) «Justification of the maximum permissible concentrations (MPC) for pollutants in the atmospheric air of populated areas».
11. Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования № 2166-80. Утв. МЗ СССР 1980 г.

Methodical recommendations on the use of behavioral reactions of animals in toxicological studies for the purposes of hygienic rationing № 2166-80. Approved by Ministry of Health of the USSR in 1980.

12. Каплан Л.А. Клиническая химия / А. Мосбей, ред. 1996.

Kaplan L.A. Clinical Chemistry / A. Mosbay, ed. 1996.

13. Саноцкий И.В. Методы определения токсичности и опасности химических веществ. М., 1970. Sanotsky I.V. Methods for the determination of toxicity and hazard of chemicals. Moscow, 1970.

14. Меркулов Г.А. Курс патогистологической техники. 1969.

Merkulov G.A. Course of pathohistological techniques. 1969.

15. Заугольников С.Д., Кочанов М.М., Лойт А.О. и др. Экспрессные методы определения токсичности и опасности химических веществ. Л., 1978.

Zaugolnikov S.D., Kochanov M.M., Loit A.O. et al. Express methods for determining the toxicity and hazard of chemicals. Leningrad, 1978.

16. Березов Т.Т., Коровкин Б.Ф. Биологическая химия. М., 2004.

Berezov T.T., Korovkin B.F. Biological chemistry. Moscow, 2004.

Поступила 22.03.2018

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE METHODOLOGY FOR EXPEDITED SETTING OF HYGIENIC STANDARDS FOR CHEMICAL SUBSTANCES POLLUTING AIR OF PILOTED ORBITAL STATIONS

Ozerov D.S., Mukhamedieva L.N.,
Barinov V.A., Sidorin G.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 62–69

A mathematical model for calculating the hygienic standards of high-toxic airborne substances aboard piloted spacecraft was developed based on the data of experimental simulation of the general toxic effect of 1,2-dichloroethane on laboratory animals. Biochemical, functional (endurance) and pathomorphological investigations brought to light hepato-, neuro- and nephrotoxic actions of the 120-d exposure to this substance. The threshold concentration was shown to be 2.0 mg/m³ and noneffective, 0.5 mg/m³. Difference in the experimentally deduced and calculated threshold and noneffective concentrations is no more than three times which advocates validity of the established mathematical relations.

Trustworthiness of the formulas was tested by calculation of standards for 13 high-toxic substances of various classes and comparative analysis of their calculated standards and empirically deduced MACs for piloted spacecraft in GOST R 50804-95. Correlation coefficient between the standards and MACs made up 0.74 ($p < 0.01$) evidencing for validity and, therefore, applicability of this mathematical tool in expedited setting standards for high-toxic substances in the practice of space toxicology.

Key words: piloted orbital stations, air pollutants, expedited hygienic rate setting, maximum admissible concentration, experiments with laboratory animals.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЧ-УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И НАГРЕВА ВОДНЫХ СРЕД СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Климарев С.И.

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

E-mail: klimarev2006@gmail.com

В статье приводится вариант оптимизации конструкции оконечного коаксиального поглощающего СВЧ-устройства для обеззараживания и нагрева питьевой воды, конденсата атмосферной влаги, воды, получаемой из мочи, а также санитарно-гигиенической воды, участвующих в круговороте основных веществ в системе жизнеобеспечения и имеющих практически одинаковую диэлектрическую проницаемость. Цель работы: повышение КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую за счет изменения формы трубки для прохода перечисленных жидкостей через СВЧ-устройство. В данном конкретном случае нагреваемая жидкость – питьевая вода. Путем моделирования процессов, происходящих в нагреваемой воде под действием СВЧ-энергии, была определена зависимость глубины проникновения СВЧ-энергии в объем нагреваемой воды при различных значениях температуры (90–40 °С) и в условиях ее потока. В итоге форма трубки представляла собой постоянно расширяющееся тело вращения от входа до выхода из нее, а не трубку постоянного сечения. Внутри трубки на ее оси был размещен турбулизатор потока воды для ее перемешивания. В результате проведенной оптимизации конструкции общее повышение поглощенной водой СВЧ-мощности составило 12,2 % и производительности – 11,5 %.

Ключевые слова: сверхвысокая частота (СВЧ), СВЧ-устройство коаксиального типа, вода, стерилизация, обеззараживание.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 5. С. 70–75.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-5-70-75

Совершенно очевидно, что метод СВЧ-обеззараживания и нагрева различных жидкостей, потребляемых человеком в повседневной жизни, не исключает другие методы воздействия (химические, с использованием ультразвука, повышенного давления и т.п.), а лишь дополняет их. Однако по сравнению с этими методами метод СВЧ-обеззараживания обладает несомненными преимуществами, такими, как малое время нагрева, высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепло, максимальная сохранность полезных свойств жидкостей, простота управления процессом нагрева. Эффективность обеззараживания, в свою очередь, обеспечивается

СВЧ-устройством, в котором и происходит взаимодействие СВЧ-энергии с нагреваемой жидкостью.

СВЧ-устройства могут быть классифицированы по ряду основных конструктивных признаков, а именно: по типу базовой передающей линии – коаксиальные, волноводные (прямоугольные, круглые, эллиптические, волноводы сложных конфигураций), полосковые, многопроводные, резонаторные; по составляющей электромагнитного поля, преимущественно взаимодействующей с нагреваемым объектом, – электрические (Е), магнитные (Н), смешанные (ТЕМ) [1].

Естественно, что выбор различных комбинационных признаков при разработке устройства определяется конкретной задачей, в данном случае – обеззараживание и нагрев водных сред системы жизнеобеспечения (СЖО), к которым относятся питьевая вода, конденсат атмосферной влаги, санитарно-гигиеническая вода.

Простейшим устройством, в котором можно осуществить воздействие СВЧ-поля на жидкость, является камера микроволновой печи, хотя она и предназначена только для приготовления и разогрева пищи.

Однако основная проблема, возникающая в камере микроволновой печи, – неравномерность нагрева продукта. Причина заключается в том, что камера, по сути, представляет собой резонатор, колебания в котором происходят в виде стоячих волн. Особенностью стоячих волн является наличие пространственных максимумов и минимумов электрического поля, а таких волн может быть множество.

Устройством, обеспечивающим равномерный нагрев в микроволновой печи, является вращающийся поддон. Вращаясь в неравномерно распределенном электрическом поле, каждая точка продукта (за исключением центра вращения) поочередно попадает в места с разной интенсивностью поля. Если продукт физически неоднороден или расположен несимметрично относительно центра вращения (обычно так и бывает), то при его вращении распределение полей различных видов колебаний будет заметно меняться. В этом случае сам продукт выступает в роли селектора волн по времени, причем достаточно эффективно. Поэтому даже в центре вращения напряженность электрического поля

будет постоянно изменяться, обеспечивая дополнительную равномерность нагрева. При этом чем больше камера и количество продукта, тем равномернее нагрев [2].

Поскольку любая жидкость имеет практически однородную структуру, ее нагрев в микроволновой печи происходит неравномерно при длительном времени воздействия (до нескольких минут) и при отсутствии перемешивания, а выравнивание температуры осуществляется за счет конвекции и теплопроводности.

Исходя из вышеизложенного, камера микроволновой печи в наименьшей степени приспособлена для обеззараживания различных жидкостей. К тому же она не обеспечивает нагрев жидкостей в условиях потока без изменения ее конструкции.

Для обеззараживания и нагрева жидкостей в условиях потока известны СВЧ-устройства с использованием прямоугольных и круглых волноводов [1, 3].

В наших исследованиях использовалось СВЧ-устройство тандемного типа, включающее в себя прямоугольный волновод с проходной камерой для нагрева жидкостей в потоке и концевой согласованной поглощающей нагрузкой. Более подробно это устройство описано в работах [4, 5]. Однако такое устройство отличается повышенными массогабаритными характеристиками.

Для снижения массогабаритных характеристик существует комбинированное СВЧ-устройство, включающее прямоугольный волновод с волноводно-коаксиальным переходом, заканчивающимся окончательным коаксиальным поглощающим устройством для нагрева жидкостей в потоке [1]. Кроме этого, существует коаксиальное СВЧ-устройство без использования прямоугольного волновода с непосредственным подсоединением магнетрона с помощью фланцевого устройства к коаксиалу [6].

Как правило, в перечисленных типах СВЧ-устройств (кроме резонаторной камеры) применяются цилиндрические трубки из радиопрозрачных материалов (кварцевое, молибденовое стекло, фторопласт) для формирования потока жидкости в зоне взаимодействия с СВЧ-энергией.

Такие трубки просты в изготовлении, однако они не учитывают изменение глубины проникновения СВЧ-энергии от изменения диэлектрической проницаемости воды при ее нагреве. Это несоответствие требует определенного подхода к исследованию и моделированию процессов, происходящих в нагреваемой воде и определяющих в итоге конструкцию СВЧ-устройства и его главного элемента – трубки для прохода нагреваемой жидкости.

Методика

Известно, что диэлектрические материалы (включая воду) полупрозрачны для СВЧ-энергии.

Поля СВЧ проникают в такие материалы на значительную глубину, которая зависит от их свойств. Взаимодействуя со средой на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движение электронов. Электроны в таких материалах движутся более или менее свободно, в зависимости от значений диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь. Движение электронов, связанное с диэлектрической проницаемостью, носит упругий характер и, по существу, приводит к запасанию энергии. Если движение электронов выходит за пределы упругости, характерные для данного материала, то происходит преобразование СВЧ-энергии в тепло.

Когда число электронов, участвующих в движении, настолько велико, что индуцированные при их движении поля по своей интенсивности приближаются к возбуждающим, результирующее поле становится равным нулю и СВЧ-энергия не может проникать внутрь материала [7].

Этот «поверхностный эффект» или глубина проникновения СВЧ-энергии определяется по формуле [8]

$$\nu = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon'_r} \operatorname{tg} \delta} ,$$

где λ_0 – длина волны, см; ε'_r и $\operatorname{tg} \delta$ – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Как упоминалось ранее, в большинстве случаев (кроме собственных) в СВЧ-устройствах применяются трубки цилиндрической формы для прохода водных сред [1].

По нашему убеждению форма трубки должна обеспечивать наиболее полное поглощение водной средой СВЧ-энергии при ее равноценном воздействии на микроорганизмы во всем интервале температур, например, при обеззараживании и нагреве воды в СЖО.

Основная практическая цель изучения нагрева воды в передающих СВЧ-энергию линиях состоит в поиске условий, обеспечивающих максимальное поглощение электромагнитной волны водой. Для обеспечения максимального поглощения электромагнитной энергии диаметр трубки СВЧ-устройства должен соответствовать глубине проникновения СВЧ-энергии в воду при выбранном интервале температуры.

В работах [9, 10] было предложено математическое описание динамики процесса СВЧ-нагрева воды в СЖО и определение геометрических характеристик трубки СВЧ-устройства для нагрева воды, т.е. ее форма. При этом имелось в виду: вся приходящая от генератора СВЧ-энергия поглощается в трубке СВЧ-устройства; напряженность электрического поля во внешнем проводнике коаксиала постоянна,

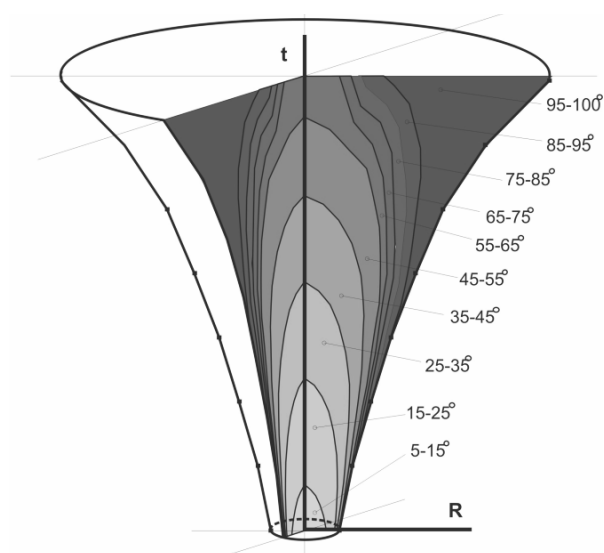


Рис. 1. Распределение температуры воды по высоте трубки СВЧ-устройства

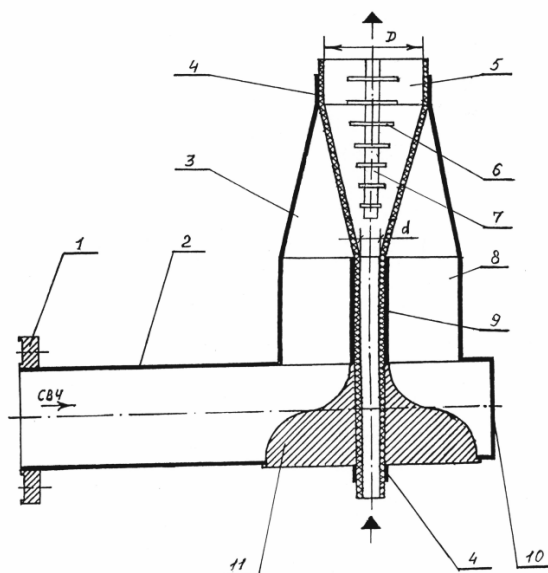


Рис. 2. Схема комбинированного волноводно-коаксиального СВЧ-устройства с турбулизатором.

1 – присоединительный фланец; 2 – прямоугольный волновод; 3 – внешний проводник коаксиала; 4 – заградительное устройство; 5 – трубка конусообразной расширяющейся формы; 6 – диск турбулизатора; 7 – стержень турбулизатора; 8 – трансформатор сопротивления; 9 – внутренний проводник коаксиала; 10 – заглушка; 11 – согласующий элемент

что подразумевает равномерность поглощения электрического поля водой по длине трубки; потоки энергии, движущиеся от поверхности трубки к ее оси и от оси к поверхности, накладываются аддитивно; явления преломления фронта волны, отражения на границе раздела двух сред, а также дифракция и интерференция волн от неоднородностей

в расчетах не учитываются; характер потока воды в трубке принимается ламинарным в рабочей области устройства; местные потери энергии, обусловленные местными изменениями формы и размера трубки не учитываются; считается, что при нагреве отдельных слоев потока воды до 100 °С, образуются пузырьки газа, которые за счет возникновения циркуляторных течений из-за разницы в плотности воды отдельных слоев в вертикальной трубке попадают в соседние более холодные слои потока и схлопываются, таким образом энергия передается более холодным слоям потока.

В этой связи были проведены расчеты электродинамических, гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в воде под действием СВЧ-энергии.

Проведенный анализ подтвердил предположение, что трубка СВЧ-устройства представляет собой постепенно расширяющееся тело вращения с образующей, близкой к экспоненциальной, а не цилиндр, используемый в ранее представленных работах.

На основании проведенных расчетных исследований были рассмотрены основные технологические характеристики (такие, как поглощенная водой СВЧ-мощность, скорость потока и температура воды) и получены вероятные распределения удельных мощностей, полей скоростей и температур. Для примера на рис. 1 представлено распределение температуры воды по высоте трубки СВЧ-устройства.

В подтверждение вышеизложенного было изготовлено волноводно-коаксиальное СВЧ-устройство с возможностью применения как цилиндрической трубки, так и трубки конусообразной расширяющейся формы для сравнения технологических параметров (поглощенной водой СВЧ-мощности, температуры нагрева воды, производительности, согласования СВЧ-генератора с устройством для нагрева воды). Схема этого устройства представлена на рис. 2. Использование трубки конусообразной расширяющейся формы, а не с образующей, близкой к экспоненциальной, не противоречит основным положениям математической модели, но значительно облегчает ее изготовление.

Учитывая некоторую неоднородность нагрева воды в объеме трубки, в конструкцию СВЧ-устройства дополнительно введен турбулизатор потока воды из радиопрозрачного материала. Турбулизатор состоит из стержня с дисками, имеющими диаметр, равный половине диаметра трубки в месте расположения диска, и располагается по оси трубки. Как и трубка конусообразной расширяющейся формы, турбулизатор выполнен из фторопласта марки Ф4.

В этом устройстве (см. рис. 2) от источника СВЧ-энергии волна Н10 распространяется по волноводу 2 и далее по волноводно-коаксиальному переходу,

Таблица

Технологические параметры нагрева воды

Конечная температура воды, °С	Оконечное коаксиальное поглощающее устройство с цилиндрической трубкой (D – 14 мм)			Оконечное коаксиальное поглощающее устройство с трубкой конусообразной расширяющейся формы и турбулизатором (D – 32 мм; d – 10 мм)		
	Погл. водой СВЧ-мощн., Вт	Производительность, мл/мин	КСВН	Погл. водой СВЧ-мощн., Вт	Производительность, мл/мин	КСВН
90	526	105	1,30	644	130	1,08
80	560	130	1,20	660	155	1,06
70	594	165	1,15	676	190	1,05
60	595	205	1,13	686	240	1,04
50	604	275	1,13	703	325	1,03
40	765	510	1,10	777	530	1,01

образованному согласующим элементом 11 с центральным проводником коаксиала 9 и трансформатором сопротивления 8, преобразуется в поперечную электромагнитную волну ТЕМ (Transverse Electric Magnetic). Далее эта волна попадает в оконечное коаксиальное поглощающее устройство, образованное внешним проводником коаксиала 3 с трубкой конусообразной расширяющейся формой 5 и турбулизатором, где и происходит нагрев воды в потоке, подаваемой самотеком снизу вверх.

Диаметр трубки d конусообразной расширяющейся формы на входе в оконечное коаксиальное поглощающее устройство составляет 10 мм и диаметр D на выходе – 32 мм, что соответствует начальной температуре воды 15 °С и конечной – 65 °С. Толщина дисков турбулизатора составляет 2 мм, а диаметр стержня турбулизатора – 5–6 мм. Высота трубки в зоне оконечного коаксиального поглощающего устройства – 70 мм. Диаметр цилиндрической трубки составляет ~14 мм.

Предполагается, что благодаря разработанной форме трубки с учетом глубины проникновения СВЧ-энергии осуществляется равноценное воздействие на поток обрабатываемой воды от входа в оконечное коаксиальное поглощающее СВЧ-устройство и до выхода из него. Это может привести к выравниванию значений поглощенной водой СВЧ-мощности в выбранном интервале температуры воды, к увеличению производительности и снижению удельных затрат энергии на нагрев воды.

В качестве СВЧ-генератора был применен магнетрон с генерируемой мощностью ~800 Вт. Рабочий диапазон частот $2,45 \pm 0,05$ ГГц. Сечение прямоугольного волновода составляет 90 x 45 мм.

В исследованиях использовалась водопроводная вода с исходной температурой ~19 °С объемом 5 л, которая подавалась самотеком через кран регулируемый и ротаметр в СВЧ-устройство для обеззараживания и нагрева воды. На входе и выходе из СВЧ-устройства устанавливались термометры для контроля температуры воды с ценой делений 0,1 и 1 °С по ГОСТ 215-57 и ГОСТ 215-73. Температура воды

изменялась дискретно и имела следующие значения: 90, 80, 70, 60, 50 и 40 °С. Данная температура устанавливалась изменением расхода воды с использованием ротаметра РЭС 3 с погрешностью измерений 5 %. Количество поглощенной водой СВЧ-мощности при этих значениях температуры и расхода воды определялось по уравнению теплового баланса. Методика определения времени пребывания воды в зоне СВЧ-нагрева и коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) по результатам исследований изложена в работе [11].

Результаты и обсуждение

Как известно, критерием, подтверждающим правильность изложенных выше результатов математического моделирования и предположений, является эксперимент. Как указывалось ранее, в исследовании использовались цилиндрическая трубка и трубка конусообразной расширяющейся формы с турбулизатором, при этом внешний проводник коаксиала выполнялся съемным и приспособленным к соответствующим размерам трубок.

Результаты сравнительных экспериментальных исследований приведены в таблице, в которой представлены основные технологические параметры, такие, как конечная температура воды, ее расход, поглощенная водой СВЧ-мощность и КСВН, характеризующий согласование СВЧ-поля с обрабатываемой водой в данном конкретном устройстве.

Из сравнения экспериментальных данных видно, что при адекватных значениях температуры воды поглощенная водой СВЧ-мощность в трубке конусообразной расширяющейся формы выше, чем в цилиндрической трубке. По усредненным показателям общее увеличение поглощенной водой СВЧ-мощности составило 12,2 % и производительности на 11,5 % при примерно одинаковых средних удельных затратах СВЧ-энергии на нагрев воды ~43,8 Вт.ч/л. Вдобавок подобное изменение конструкции СВЧ-устройства привело к выравниванию показателей поглощенной СВЧ-мощности в

области высоких температур (90, 80, 70 и 60 °C), когда глубина проникновения СВЧ-энергии в воду максимальна за счет снижения диэлектрической проницаемости воды, т.е. произошла компенсация потерь СВЧ-мощности по сравнению с цилиндрической трубкой, что в общем-то подтверждает правильность выбранного направления дальнейших исследований, связанных с воздействием этого преимущества на микроорганизмы, находящиеся в нагреваемой воде.

Казалось бы, инженерами-практиками и исследователями давно изучено влияние энергии, переносимой электромагнитной волной, на эффективные потери, которые проявляются в виде тепла, выделившегося в диэлектрике, в данном случае в воде. Однако до сих пор в СВЧ-устройствах для нагрева и обеззараживания различных жидкостей используются в основном цилиндрические трубки, не учитывающие такой важный показатель, как глубина проникновения СВЧ-энергии в воду, который может в итоге привести к снижению температуры обеззараживания за счет равноценного воздействия электромагнитной энергии на микроорганизмы во всем объеме нагреваемой жидкости.

В этой работе предпринята попытка закрыть этот пробел собственными экспериментальными исследованиями, что и было выполнено.

Выводы

1. Применение трубки конусообразной расширяющейся формы в оконечном коаксиальном поглощающем устройстве расширяет возможности известного СВЧ-устройства по поглощенной водой СВЧ-мощности на 12,2 % и производительности на 11,5 % за счет обеспечения постоянства напряженности электрической составляющей электромагнитного поля по всей высоте трубки.

2. Наличие турбулизатора потока нагреваемой воды на оси трубки обеспечивает ее перемешивание, что улучшает технологические параметры СВЧ-устройства в целом.

Работа выполнена в рамках базовой НИР РАН, номер госрегистрации 01201373016.

Список литературы

1. Игнатов В.В., Панасенко В.И., Пиденко А.П. и др. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку. 1978. С. 32–43.
Ignatov V.V., Panashenko V.I., Pidenko A.P. et al. Development of electromagnetic fields of the microwave range on the bacterial cell. 1978. P. 32–43.
2. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей // Ремонт. 2004. № 19. С. 41–52.

- Sapunov G.S. Microwave oven repair // Remont. 2004. № 19. P. 41–52.
3. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия. 1998. С. 278–291.
Archangelsky Yu.S. UHF electrotermia. 1998. P. 278–291.
4. Климарев С.И., Синяк Ю.Е. Обеззараживание воды при комбинированном воздействии СВЧ-энергии и активного хлора, образующегося при ее электролизе // Авиакосм. и экол. мед. 2014. Т. 48. № 2. С. 48–51.
Klimarev S.I., Sinyak Yu.E. Water Disinfection by the combined exposure to super-high frequency energy and available chlorine produced during water electrolysis // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2014. V. 48. № 2. P. 48–51.
5. Климарев С.И., Григорьев А.И., Синяк Ю.Е. Способ обеззараживания и нагрева жидкостей и устройство для его осуществления. Патент № 2627899. 2017.
Klimarev S.I., Grigoriev A.I., Sinyak Yu.E. Method disinfection and heating of water and device for its realization. Patent № 2627899. 2017.
6. Климарев С.И., Синяк Ю.Е., Зайцев К.А., Канатова Г.В. Исследование стерилизующего воздействия СВЧ-энергии на воду // Авиакосм. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 6. С. 44–48.
Klimarev S.I., Sinyak Yu.E., Zaitsev K.A., Kanatova G.V. Evaluation of the UHF-energy sterilizing effect on water // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 6. P. 44–48.
7. СВЧ-энергетика // Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / Э. Окресс, ред. М., 1971. Т. 2. С. 9–10.
Microwave power engeneering // Microwave energy applications in industry / E. Okress, ed. Moscow, 1971. V. 2. P. 9–10.
8. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: Пер. с англ. М., 1968.
Pyushner G. Heating with microwaves: Transl. from Engl. Moscow, 1968.
9. Старкова Л.В. Разработка технологии деконтаминации санитарно-гигиенической воды глубоководных водолазных комплексов микроволновой энергией: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1999.
Starkova L.V. Development of technology for decontamination of sanitary-hygienic water of deep-water diving complexes by microwave energy: Dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk. Moscow, 1999.
10. Климарев С.И. Интенсификация физико-химических процессов СВЧ-энергией в регенерационной системе жизнеобеспечения экипажа космического корабля: Дис. ... докт. техн. наук. М., 2009.
Klimarev S.I. Intensification of physical chemical processes UHF-energy in regenerative life support system for crew of spaceship: Dissertatsiya ... doctora tekhnicheskikh nauk. Moscow, 2009.
11. Климарев С.И., Канатова Г.В. СВЧ-установка для обеззараживания и нагрева питьевой воды в системе жизнеобеспечения // Авиакосм. и экол. мед. 2010. Т. 44. № 6. С. 59–62.

Klimarev S.I., Kanatova G.V. SHF-unit for disinfection and heating potable water within the life support system // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2010. V. 44. № 6. P. 59–62.

Поступила 22.05.2018

OPTIMIZATION OF THE UHF-DEVICE DESIGNED FOR LIFE SUPPORT SYSTEM WATER DECONTAMINATION AND HEATING

Klimarev S.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 5. P. 70–75

The paper introduces an option to improve design of a terminal coaxial absorbing USF-device intended for

potable water decontamination and heating, atmospheric condensate, water regenerated from urine and washing water that circulate within the life support system turnover and have essentially identical dielectric permeability. The goal was to increase efficiency of USF energy conversion into heat by reshaping the water tube inside the device. Potable water is the only one that needs heating. Modeling of the processes in water during heating by USF energy made it possible to correlate depth of UHF energy penetration with flowing water temperature (90–40 °C). It was found that the tube was in the form of a body of revolution gradually expanding from the port to discharge rather than a tube with a uniform cross-section. On the internal axis of the tube there was a turbulator. As a result of this design optimization, general UHF power absorption by water increased 12.2 % and throughput grew by 11.5 %.

Key words: ultra high frequency (UHF), coaxial UHF-device, water, sterilization, decontamination.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами сотрудников ИМБП:

Бойко Веру Алексеевну

Золотова Василия Васильевича

Ильинскую Елену Александровну

Кокореву Лидию Васильевну

Комарова Геннадия Сергеевича

Малахову Наталью Николаевну

Мыськину Нину Петровну

Никитина Владимира Борисовича

Пасекову Ольгу Борисовну

Пастушкову Людмилу Ханифовну

Полякова Алексея Васильевича

Тюрина Евгения Яковлевича

Шевалдышева Бориса Пантелеевича

Шерстобитова Николая Александровича

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!