АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА
AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Орлов О.И., д.м.н., член-корреспондент 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.м.н., профессор
Давыдов Б.И., д.м.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.
Меденков А.А., к.психол.н., д.м.н., профессор
Носков В.Б., д.м.н.
Синяк Ю.Е., к.х.н., д.т.н., профессор
Сорокин О.Г., к.м.н.
Усов В.М., д.м.н., профессор
Хоменко М.Н., д.м.н., профессор
Шипов А.А., д.б.н. – ответственный секретарь
Родионова Н.В., д.б.н., профессор (Украина)
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 АНРК (Казахстан)
Gerzer R., M.D., Ph.D., professor (Germany)
Gharib C., Ph.D., professor (France)
Yinghui Li, M.D., Ph.D., professor (China)

2016 Т. 50 № 3

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, 2016
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2016

Все права зарегистрированы. Никакая часть журнала не может быть воспроизведена
каким-либо способом без письменного разрешения Издателя
All rights reserved. Articles and information contained in this publication may not be reproduced
in any form or translated without the written of the Editorial Board

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

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

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

Сдано в набор 18.05.2016.
Подписано в печать 03.06.2016.
Формат 60 × 84 1/8.
Гарнитура Tahoma.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,60.
Тираж 250 экз.
Заказ № 142.

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга».
Адрес: 394030, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 11б.

Содержание

Contents

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Котовская А.Р., Фомина Г.А., Алферова И.В., Сальников А.В. Прогнозирование ортостатической устойчивости космонавтов в невесомости по состоянию вен нижних конечностей в течение 6-месячных космических полетов **5**

Новикова Н.Д., Поддубко С.В., Дешевая Е.А., Наголкин А.В., Володина Е.В., Загидуллов М.Ф. Итоги и перспективы использования технологии микробиологической очистки воздуха с помощью установок «Поток» в космической медицине **10**

Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Ерохин А.Н., Смолянина С.О., Яковлева О.С., Знаменский А.И., Тараканов И.Г., Радченко С.Г., Лапач С.Н., Трофимов Ю.В., Цвирко В.И. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи **17**

Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Эффективные дозы облучения ионизирующей радиацией космонавтов при выполнении внекорабельной деятельности **23**

Смирнов С.К., Ильин В.К., Усанова Н.А., Гордеев Ю.В., Орлов О.И. Исследование эффективности использования пребиотика Эубикора для профилактики дисбактериозов в отдаленном восстановительном периоде организма после γ-облучения **30**

Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В., Толочек Р.В., Труханов К.А. Хромосомные нарушения в семенах салата при комбинированном последовательном воздействии ускоренных ионов аргона и гипомагнитных условий **35**

Клинические исследования

Джимак С.С., Басов А.А., Федулова Л.В., Быков И.М., Ивлев В.А., Мелконян К.И., Тимаков А.А. Определение концентрации дейтерия в биологических жидкостях с помощью ЯМР-спектроскопии **42**

Experimental and Theoretical Investigations

Kotovskaya A.R., Fomina G.A., Alferova I.V., Salnikov A.V. Predicting orthostatic stability of cosmonauts in microgravity by the condition of lower extremities veins in the course of 6-month space flights **5**

Novikova N.D., Poddubko S.V., Deshevaya E.A., Nagolkin A.V., Volodina E.V., Zagidullov M.F. Resume and prospects for integration in space medicine of the microbiological air purification technology with the use of systems «Potok» **10**

Konovalova I.O., Berkovich Yu.A., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Yakovleva O.S., Znamensky A.I., Tarakanov I.G., Radchenko S.G., Lapach S.N., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I. Optimization of a light-emitting diode-based illumination system of a vitamin space greenhouse **17**

Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Effective doses from ionizing radiation exposure of cosmonauts during extravehicular activity **23**

Smirnov S.K., Ilyin V.K., Usanova N.A., Gordeev Yu.V., Orlov O.I. Evaluation of effectiveness of prebiotic Eubicor for prevention of dysbacteriosis in a delayed period of body rehabilitation after γ-irradiation **30**

Platova N.G., Lebedev V.M., Spassky A.V., Tolochek R.V., Trukhanov K.A. Chromosomal disorders in lettuce seeds due to combined sequential exposure to accelerated ions of argon and hypomagnetic environment **35**

Clinical Investigations

Dzhimak S.S., Basov A.A., Fedulova L.V., Bykov I.M., Ivlev V.A., Melkonyan K.I., Timakov A.A. Determination of deuterium concentration in biological liquids with the use of NMR-spectroscopy **42**

Кальманов А.С., Макаров Е.В., Шишкин А.Н., Писарев А.А., Бубеев Ю.А. Оперативная коррекция функционального состояния водолазов с помощью ингаляций специальных газовых смесей на основе ксенона в процессе учебно-тренировочных сборов **48**

Kalmanov A.S., Makarov E.V., Shishkin A.N., Pisarev A.A., Bubeev Yu.A. Temporary correction of the functional status of divers by inhalation of special xenon-based gas mixtures in the course of instructional and training sessions

Методики

Methods

Гущин В.И., Юсупова А.К., Швед Д.М., Чекалина А.Г., Шуева Л.В., Кузнецова П.Г., Виноходова А.Г., Карпова О.И., Чернова Е.Г. Методологические подходы к контент-анализу общения космического экипажа **55**

Gushchin V.I., Yusupova A.K., Shved D.M., Chekalina A.G., Shueva L.V., Kuznetsova P.G., Vinokhodova A.G., Karpova O.I., Chernova E.G. Methodological approaches to content-analysis of spacecrew communication

Гавриш Н.Н., Грабский Ю.В., Панкратов В.В., Аминов А.М., Максимов С.Г., Кущёв Г.Г. Методический подход к прогнозу работоспособности специалистов-операторов в экстремальных условиях деятельности при применении фармакологических средств коррекции функционального состояния организма с учетом экстраполяции данных от животных к человеку **65**

Gavrish N.N., Grabsky Yu.V., Pankratov V.V., Aminov A.M., Maksimov S.G., Kushchev G.G. Methodical approach to predicting efficiency of professional operators in extreme conditions using pharmacological agents to correct the functional state of organism based on animal data extrapolation on humans

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 613.693+611.14:611.98:001.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОРТОСТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОСМОНАВТОВ В НЕВЕСОМОСТИ ПО СОСТОЯНИЮ ВЕН НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ В ТЕЧЕНИЕ 6-МЕСЯЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Котовская А.Р., Фомина Г.А., Алферова И.В., Сальников А.В.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
E-mail: kotovskaia@imbp.ru

В статье представлены результаты исследований состояния вен нижних конечностей методом окклюзионной плетизмографии голени у 29 российских космонавтов, выполненных до, во время и после 6-месячных космических полетов (КП) на российском сегменте Международной космической станции в период с 2010 по 2015 г.

Установлено, что степень изменений емкости, растяжимости вен и скорости их наполнения при окклюзионной пробе, а также динамика изменений в период пребывания в невесомости позволяют прогнозировать индивидуальную ортостатическую устойчивость (ОУ) космонавтов в течение 6-месячных КП. Установлено, что наиболее значимым для прогноза ОУ во время КП является изменение скорости наполнения вен: снижение этого показателя является благоприятным признаком, повышение – неблагоприятным. Одновременное увеличение емкости, растяжимости и скорости наполнения вен нижних конечностей может указывать на существенное снижение ОУ человека. Постепенное восстановление состояния вен нижних конечностей, а также ОУ космонавтов после полета до исходного (предполетного) уровня свидетельствует об адаптивном характере возникающих в невесомости изменений.

Ключевые слова: невесомость, вены, ортостатическая устойчивость, прогноз.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 5–9.

Известно, что генез ортостатической неустойчивости в невесомости является многофакторным, включающим перераспределение крови, гиповолемию и изменение регуляции сосудистого тонуса артерий и вен нижних конечностей [1–8].

Для космической медицины особую значимость имеет возможность прогнозировать изменения ортостатической устойчивости (ОУ) космонавтов в условиях длительного пребывания в невесомости. Ранее авторами при обследовании всего 13 космонавтов были получены результаты, свидетельствующие о возможной связи снижения ОУ космонавтов в ходе полета с изменениями вен нижних конечностей [9].

Цель данной работы – определить возможность индивидуального прогнозирования ортостатической устойчивости космонавтов в космическом полете (КП) по данным окклюзионной плетизмографии голени.

Необходимо было решить следующие задачи:

– установить направленность и степень изменений венозной емкости, растяжимости и скорости наполнения вен нижних конечностей космонавтов при окклюзионной пробе в невесомости;

– сопоставить данные исследований вен нижних конечностей в ходе КП с оценкой ОУ по переносимости пробы с воздействием отрицательного давления на нижнюю половину тела (ОДНТ);

– определить возможность прогноза ОУ космонавтов в полете по данным исследования вен нижних конечностей.

Методика

Исследования выполнены с участием 29 российских космонавтов-мужчин в возрасте от 35 до 60 лет, совершивших полеты на российском сегменте (РС) на Международной космической станции (МКС) средней продолжительностью 163 ± 3 сут. Обследования вен нижних конечностей методом окклюзионной плетизмографии голени выполнялись на Земле до полета за 60 и 30 сут до старта (фон до КП), во время КП – в конце 2-го и 5-го месяца КП, а также после завершения КП – в 0-е и 8-е сутки послеполетного периода.

Проба с воздействием ОДНТ выполнялась в рамках медицинского контроля на Земле до полета (сбор фоновых данных), а также во время КП – за 2 нед до его завершения. Профиль пробы с ОДНТ: -25 мм рт. ст. – 1 мин, -35 мм рт. ст. – 2 мин, -40 мм рт. ст. – 3 мин, -50 мм рт. ст. – 3 мин. Переносимость пробы с ОДНТ оценивалась специалистами группы медицинского обеспечения по трем градациям: хорошая, удовлетворительная или плохая. Исследования вен нижних конечностей в конце 5-го месяца полета выполнялись за 1–3 сут до пробы с ОДНТ, данные передавались на Землю. Изменения основных показателей состояния вен, а также объем голени каждого космонавта

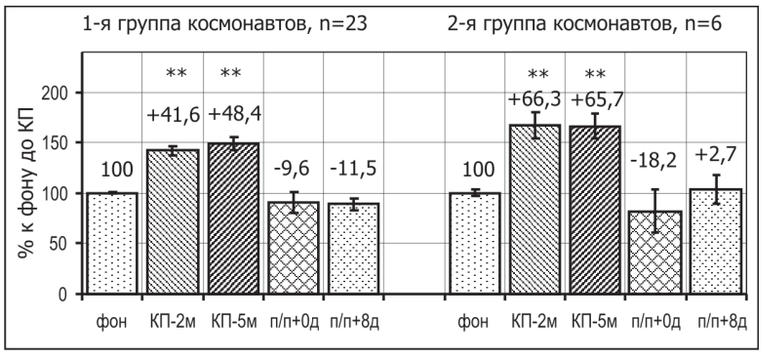


Рис. 1. Изменения относительной венозной емкости при окклюзионном давлении 50 мм рт. ст. у космонавтов 1-й и 2-й групп во время и после КП (M ± m).

Здесь и на рис. 2–4: M – средняя величина; m – средняя ошибка средней величины; * – достоверность различия с фоном с вероятностью более 95 %; ** – достоверность различия с фоном с вероятностью более 99 %

оценивались в процентах к индивидуальным предполетным данным, которые приняты за 100 %. На основании данных исследования вен нижних конечностей составлялся индивидуальный прогноз переносимости пробы с ОДНТ.

Программа исследований одобрена комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Протокол № 333 от 08.10.2013. Было также получено Информированное согласие каждого космонавта на участие в исследованиях.

Результаты и обсуждение

Изменения емкости и растяжимости вен ног в невесомости всегда были однонаправленными: оба показателя увеличивались у всех космонавтов, хотя и в разной степени. Скорость наполнения вен изменялась разнонаправленно: у большинства космонавтов зарегистрировано значительное снижение скорости артериального притока и средней скорости наполнения вен, а у небольшого числа космонавтов отмечено повышение этих показателей в период пребывания в невесомости. Именно этот признак (направленность изменений скорости наполнения вен в период пребывания в невесомости) был взят за основу для условного разделения космонавтов на 2 группы. В 1-ю группу вошли 23 космонавта (из 29), у которых величина этих показателей существенно снижалась по сравнению с фоном. Поскольку таких космонавтов было большинство, изменения основных показателей состояния вен в этой группе можно считать «типичными» для условий невесомости. Во 2-ю группу вошли всего 6 космонавтов (из 29), у которых в ходе полета было отмечено повышение скорости артериального притока и повышение, либо незначительное снижение средней скорости наполнения вен.

До полета космонавты 1-й и 2-й группы практически не отличались по объему голени и исходным величинам плетизмографических показателей, а также по возрасту.

Далее рассмотрим изменения объема голени, венозной емкости, растяжимости и скорости наполнения вен у космонавтов 1-й и 2-й группы в ходе и после КП в процентах по отношению к средним предполетным данным.

Объем голени в условиях невесомости уменьшался у космонавтов обеих групп ко 2-му месяцу КП – на 15–25 % от фона, а затем – стабилизировался на измененном уровне до конца полета. В день посадки объем голени был в среднем на 6,8 % ниже исходного, а на 8-е сутки после посадки практически приблизился к фону до КП.

Наиболее ярким проявлением влияния невесомости на состояние вен нижних конечностей являлось увеличение венозной емкости на всех ступенях окклюзионного теста, т.е. при различном окклюзионном давлении (ОД). На рис. 1 показаны изменения относительной венозной емкости при ОД = 50 мм рт. ст. в 1-й и 2-й группах космонавтов во время и после КП.

Как видно из рис. 1, емкость вен голени в условиях невесомости значительно и статистически достоверно ($p < 0,01$) увеличивалась в обеих группах космонавтов. Важно отметить, что изменения были однонаправленными, но индивидуально различными по величине – от +20 до +100 % от фона. В 1-й группе космонавтов (23 человека) увеличение венозной емкости в невесомости в среднем не превышало +50 % от фоновых значений. Во 2-й группе космонавтов (6 человек) увеличение венозной емкости было более выраженным и в среднем по группе превышало +65 % от фона. В обеих группах, начиная со 2-го месяца КП и далее до конца КП, величина венозной емкости стабилизировалась на измененном уровне. Увеличение венозной емкости и одновременное снижение объема голени обусловлены, по-видимому, перераспределением жидких сред организма, что подтверждается полной синхронностью и противоположной направленностью изменений этих показателей в невесомости. Следует отметить, что в обеих группах изменения носили преходящий характер и после возвращения к земной гравитации объем голени и венозная емкость постепенно восстанавливались.

Растяжимость вен также увеличивалась в период пребывания в невесомости у всех обследованных космонавтов обеих групп, но в различной степени (рис. 2). У космонавтов 1-й группы увеличение растяжимости вен не превышало +30 % от фона до КП. Во 2-й группе повышение растяжимости вен было более

существенным и в среднем по группе достигало +42 – +43 % к данным до КП.

После КП у космонавтов 1-й группы растяжимость вен голени в день посадки была близка к предполетной ($p > 0,05$), а к 8-м суткам была даже немного ниже фоновых данных. Во 2-й группе растяжимость вен снизилась по сравнению с величинами, наблюдавшимся в ходе КП, но оставалась несколько выше предполетных значений, хотя различие не было достоверным ($p > 0,05$). Увеличение растяжимости вен способствовало повышению венозной емкости, и это влияние было более существенным во 2-й группе космонавтов.

Скорость артериального притока, как видно из рис. 3, в период пребывания в невесомости в обеих группах космонавтов достоверно изменилась по сравнению с фоном, но изменения в группах были противоположно направлены: в 1-й группе наблюдалось существенное снижение этого показателя (более чем на 35 % от фона), а во 2-й – значительное повышение, более чем на +50 %, а в некоторых индивидуальных случаях на +150 % от фоновых данных, т.е. в 2,5 раза. Различие между группами по величине этого показателя во время КП статистически достоверно ($p < 0,05$).

В течение 1-й недели послеполетного периода в 1-й группе скорость артериального притока оставалась сниженной, но наблюдалась тенденция к ее восстановлению. У космонавтов 2-й группы после полета отмечены выраженные индивидуальные различия и нестабильность этого показателя с тенденцией к периодическому повышению.

Изменения средней скорости наполнения вен в период пребывания в невесомости также заметно отличались у космонавтов 1-й и 2-й групп (рис. 4). Из рисунка можно видеть, что в 1-й группе снижение средней скорости наполнения по отношению к фону было выраженным, на 50 % и более, $p < 0,01$. Во 2-й группе во время полета изменения средней скорости наполнения вен в ходе КП были нестабильны и статистически недостоверны ($p > 0,05$). При сравнении 1-й и 2-й групп очевидно, что в период пребывания в невесомости средняя скорость наполнения вен была выше во 2-й группе. После КП в 1-й группе наблюдалась тенденция к восстановлению этого показателя, а во 2-й – нестабильность с периодами снижения и повышения.

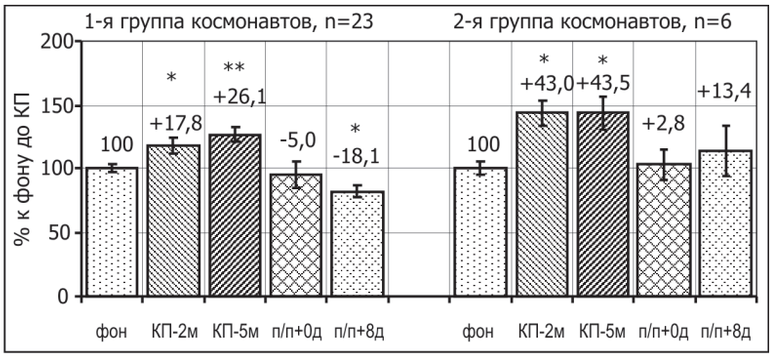


Рис. 2. Изменения растяжимости вен голени у космонавтов 1-й и 2-й групп во время и после КП (M ± m).

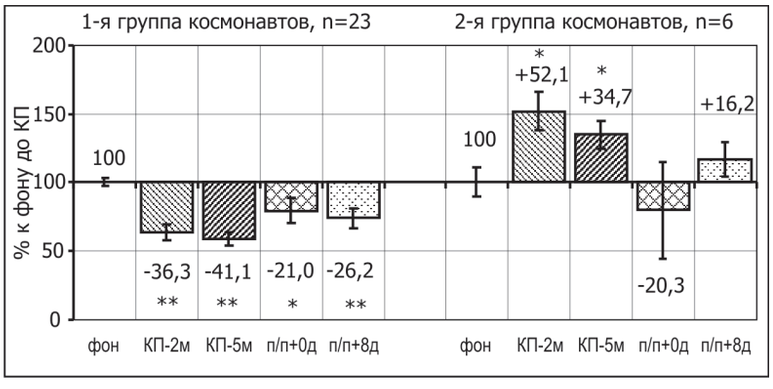


Рис. 3. Изменения скорости артериального притока у космонавтов 1-й и 2-й групп во время и после КП (M ± m)

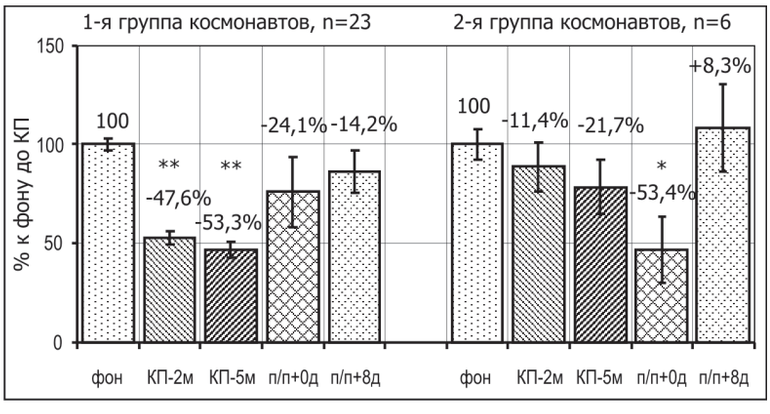


Рис. 4. Изменения средней скорости наполнения вен во время и после КП в 1-й и 2-й группах космонавтов (M ± m)

Результаты исследований вен в 1-й и 2-й группах космонавтов были сопоставлены с оценкой их ОУ во время полета (по данным переносимости пробы с ОДНТ.) Результаты этого сопоставления представлены в таблице. Как видно из таблицы, у большинства космонавтов (1-я группа, 23 человека) увеличение емкости и растяжимости вен в ходе КП не превышало +50 и +30 % соответственно, при этом наблюдалось выраженное снижение скорости

Таблица

Прогнозирование ортостатической устойчивости в зависимости от степени изменений состояния вен

1-я группа космонавтов, n = 23	2-я группа космонавтов, n = 6
Увеличение венозной емкости не более чем на 40–50 % по отношению к фону до КП	Увеличение венозной емкости более чем на 50 % по отношению к фону до КП
Увеличение растяжимости вен менее чем на 30 % по отношению к фону до КП	Увеличение растяжимости вен более чем на 30 % по отношению к фону до КП
Снижение скорости артериального притока по отношению к фону до КП	Увеличение скорости артериального притока по отношению к фону до КП
Стабилизация изменений после 2-го месяца КП	Нестабильность изменений на всем протяжении КП
Прогноз: удовлетворительная переносимость пробы с ОДНТ	Прогноз: плохая переносимость пробы с ОДНТ
Прогноз подтвердился у 19 космонавтов (в 82,6 % наблюдений)	Прогноз подтвердился у 5 космонавтов (в 83,3 % наблюдений)
В целом прогноз ортостатической устойчивости в ходе КП подтвердился у 24 из 29 космонавтов (в 82,8 % наблюдений)	

артериального притока и средней скорости наполнения вен. Изменения стабилизировались на измененном уровне после 2-го месяца КП. Для этих космонавтов по данным исследования вен во время полета прогнозировалось умеренное снижение ОУ (т.е. переносимость пробы с ОДНТ не ниже удовлетворительной). Реальная оценка ОУ переносимости проб с ОДНТ, выполненных через 1–3 сут после исследования вен, показала, что большинство космонавтов 1-й группы (19 человек из 23) демонстрировали удовлетворительную, а в некоторых случаях – хорошую ОУ. Это означает, что увеличение венозной емкости до +50 %, а растяжимости вен – до +30 % по отношению к фону не являлось критическим для снижения ОУ, при условии, что это увеличение компенсировалось существенным снижением скорости наполнения вен.

Во 2-й, небольшой группе космонавтов (6 человек) изменения состояния вен во время полета существенно отличались от «типичных». Венозная емкость увеличилась в среднем на +66,3 ± 12,0 % по сравнению с фоном, растяжимость вен возросла более чем на 30 % и, в отличие от 1-й группы, наблюдалось не снижение, а увеличение скорости артериального притока, до +55 – +60 % по отношению к предполетным величинам. Выраженное увеличение венозной емкости и растяжимости, повышение скорости наполнения вен и нестабильность изменений в течение полета явились основанием для прогноза существенного снижения ОУ у космонавтов 2-й группы. Прогноз подтвердился у 5 космонавтов, у которых переносимость ОДНТ была оценена как плохая. У 1 из 6 космонавтов 2-й группы переносимость ОДНТ была оценена удовлетворительной. В целом, прогноз ОУ по исследованиям вен нижних конечностей, выполненным во время КП за 1–3 сут до пробы с ОДНТ, подтвердился в 82,8 % случаев (у 24 из 29 обследованных космонавтов). Иными словами, была определена возможность прогноза изменения ОУ во время полета у значительного большинства космонавтов. Следует отметить, что на фоне повышения емкости и растяжимости вен в условиях невесомости у всех космонавтов, наиболее важным, ключевым показателем состояния вен ног является изменение скорости наполнения вен. Применительно к прогнозу ОУ во время полета благоприятным признаком является снижение скорости наполнения вен и, напротив, неблагоприятным – повышение этого показателя. При составлении прогноза главную роль играют результаты исследования вен, непосредственно предшествующие пробе с ОДНТ, с учетом динамики изменений основных показателей на протяжении всего полета. Особого внимания заслуживают случаи, когда прогноз ОУ по состоянию вен космонавтов не подтвердился. Так, в 4 случаях при весьма умеренных изменениях со стороны вен ОУ была оценена хуже прогнозируемой, или в 1 случае при значительных изменениях вен ОУ была лучше прогнозируемой. Очевидно, что среди причин, которые могут влиять на ОУ в невесомости, в упомянутых случаях ведущую роль играли не только изменения состояния вен, но и другие значимые для ОУ изменения, например, степень гиповолемии организма или изменения регуляции сосудистого тонуса.

Выводы

1. Определены основные показатели состояния вен нижних конечностей (емкость и растяжимость вен, скорость их наполнения, а также динамика этих показателей на протяжении полета), позволяющие прогнозировать ОУ космонавтов (переносимость пробы с ОДНТ) в 6-месячных КП.
2. Установлена возможность прогнозировать индивидуальную ОУ космонавтов по степени и характеру изменений основных показателей состояния вен нижних конечностей в ходе 6-месячного пребывания в невесомости.
3. Увеличение венозной емкости менее, чем на 50 % и увеличение растяжимости вен менее, чем на 30 % при снижении скорости наполнения вен более, чем на 40–50 % от фоновых величин являются благоприятными признаками незначительного снижения ОУ человека в невесомости.

4. Увеличение венозной емкости более, чем на 50 % и растяжимости вен более чем на 30 % от фона при увеличении скорости наполнения вен являются неблагоприятными признаками выраженного снижения ОУ в невесомости.

5. Постепенное восстановление состояния вен нижних конечностей, а также ОУ космонавтов в послеполетном периоде до исходного (предполетного) уровня свидетельствует об адаптивном характере возникающих в невесомости изменений.

Работа выполнена в рамках темы СЧ ОКР «МКС» (ИМБП).

Список литературы

1. *Пестов И.Д., Гератеволь З.Дж.* Невесомость // Основы космической биологии и медицины. М., 1975. Т. 2. Кн. 1. С. 324–369.

Pestov I.D., Geratevol Z.Dzh. Weightlessness // Foundation of space biology and medicine. Joint USA/USSR Publication. 1975. Moscow., V. 2. B. 1. P. 305–354.

2. *Григорьев А.И., Егоров А.Д.* Феноменология и механизмы изменения основных функций организма человека в невесомости // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1988. Т. 22. № 1. С. 4–17.

Grigoriev A.I., Egorov A.D. Phenomenology and mechanism of changes in main functions of human body in weightlessness // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1988. V. 22. № 1. P. 4-17.

3. *Егоров А.Д.* Механизмы снижения ортостатической устойчивости в условиях длительных космических полетов // Авиакосм. и экол. мед. 2001. Т. 35. № 6. С. 3–12.

Egorov A.D. Reducing mechanisms of orthostatic stability in long-duration space flight // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2001. V. 35. № 6. P. 3–12.

4. *Grandpierre R., Colleu M., Hauttement J.L. et al.* Intérêt et movens d'étude de la circulation sanguine périphérique an apesanteur // «Человек в космосе». Тр. IV Межд. симп. по основ. проблемам жизни человека в косм. пространстве. (Ереван, 1971). М., 1974. С. 125–141.

Grandpierre R., Colleu M., Hauttement J.L. et al. Intérêt et movens d'étude de la circulation sanguine périphérique an apesanteur // Proc. of IV Intern. Symp. «Human in Space». (Yerevan, 1971). Moscow, 1974. P. 125–141.

5. *Шик Л.Л., Сергеева К.А., Моисеев В.А.* Изучение причин ортостатической неустойчивости // Проблемы космической биологии. М., 1975. Т. 31. С. 157–164.

Shik L.L., Sergeeva K.A., Moiseev V.A. Investigation of orthostatic instability causes // Problems of space biology. Moscow, 1975. V. 31. P. 157–164.

6. *Хаютин В.М., Шендеров С.М., Захаров А.Г., Рогоза А.Н.* Ортостатическая неустойчивость кровообращения: роль детренированности резистивных сосудов // Косм. биол. и авикосм. мед. 1984. Т. 18. № 4. С. 4–12.

Hayutin V.M., Shenderov S.M., Zakharov A.G., Rogoza A.N. Orthostatic instability of blood circulation: the role of resistive vessels detraining // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1984. V. 18. № 4. P. 4–12.

7. *Носков В.Б., Ничипорук И.А., Григорьев А.И.* Динамика жидкостных сред и состава тела в условиях длительного космического полета (биоимпедансный анализ) // Авиакосм. и экол. мед. 2007. Т. 41. № 3. С. 3–7.

Noskov V.B., Nichiporuk I.A. Grigoriev A.I. Dynamics of the body liquids and composition in long-duration space flight (bio-impedance analysis) // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2007. V. 41. № 3. P. 3–7.

8. *Фомина Г.А., Котовская А.Р.* Изменения гемодинамики в условиях длительной невесомости и значение гиповолемии // Там же. 2008. Т. 42. № 2. С. 21–25.

Fomina G.A., Kotovskaya A.R. Changes in hemodynamics under conditions long-term microgravity and significance of hypovolemia // Ibid. 2008. V. 42. № 2. P. 21–25.

9. *Котовская А.Р., Фомина Г.А.* Венозная гемодинамика человека в невесомости и прогнозирование ортостатической устойчивости в полете // Там же. 2013. Т. 47. № 1. С. 37–42.

Kotovskaya A.R., Fomina G.A. Human venous hemodynamics in microgravity and prediction of orthostatic tolerance in flight // Ibid. 2013. V. 47. № 1. P. 37–42.

Поступила 11.04.2016

PREDICTING ORTHOSTATIC STABILITY OF COSMONAUTS IN MICROGRAVITY BY THE CONDITION OF LOWER EXTREMITIES VEINS IN THE COURSE OF 6-MONTH SPACE FLIGHTS

Kotovskaya A.R., Fomina G.A., Alferova I.V., Salnikov A.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 5–9

The paper presents the results of leg occlusive plethysmography performed in 29 cosmonauts before, in and after 6-month missions on the Russian segment of the International space station in the period from 2010 through to 2015.

It was stated that the level of change in venous capacity, compliance and rate of filling during the occlusion test as well as dynamics of these changes during microgravity can predict cosmonaut's orthostatic stability (OS) in long-duration missions. The most significant in-flight predictor is the rate of filling, i.e. its reduction is a good sign, whereas increase is untoward. Concurrent increases in venous capacity, compliance and filling rate may testify to a drastic OS decline. Gradual recovery of the baseline (pre-flight) status of leg veins together with OS suggests an adaptive nature of the changes developing in microgravity.

Key words: microgravity, veins, orthostatic stability, prognosis.

УДК 579.65+613.155:614.487

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВОК «ПОТОК» В КОСМИЧЕСКОЙ МЕДИЦИНЕ

Новикова Н.Д.[1], Поддубко С.В.[1], Дешевая Е.А.[1], Наголкин А.В.[2], Володина Е.В.[2], Загидуллов М.Ф.[2]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма "Поток Интер"», Москва

E-mail: Deshevaya@imbp.ru

Результаты многолетних микробиологических исследований, проведенных на борту орбитальных комплексов «Мир» и Международной космической станции, показали, что установки обеззараживания воздуха (УОВ) «Поток 150МК» являются эффективным средством обеспечения биологической чистоты и безопасности воздуха. Они осуществляют инактивацию микроорганизмов, формирующих микрофлору среды обитания пилотируемых космических аппаратов, и позволяют поддерживать нормируемые санитарно-микробиологические показатели воздушной среды. В космической отрасли представляется перспективным использование УОВ «Поток» не только в процессе длительного пилотируемого полета, но и при предстартовой подготовке грузовых и транспортных космических аппаратов, а также при сборке беспилотных космических кораблей для обеспечения требований планетарного карантина при полетах на другие планеты

Ключевые слова: среда обитания пилотируемых космических аппаратов, микроорганизмы, обеззараживание воздуха, технология «Поток».

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 10–16.

Опыт пилотируемой космонавтики убедительно продемонстрировал, что одним из важных факторов риска на орбитальных космических станциях с длительным сроком эксплуатации является микробиологический, способный оказывать негативное влияние как на состояние здоровья людей, так и на надежность и безопасность работы космической техники. При продолжительном пребывании космонавтов на орбитальных комплексах в связи с особенностями предполетных дезинфекционных мероприятий постоянно возникает возможность заноса микрофлоры при смене экипажей, а также в процессе доставки на станцию грузов и новых модулей.

Наиболее сложным в создании качественной воздушной среды пилотируемых космических аппаратов является уничтожение микроорганизмов без причинения вреда здоровью членам экипажа. В настоящее время существует несколько способов обеззараживания воздуха в замкнутых помещениях в присутствии людей. Это, прежде всего, ультрафиолетовое (УФ) излучение, искусственная ионизация воздуха, фотокатализ и фильтрация.

При использовании УФ-излучения лимитирующим фактором является предельно допустимая доза для людей, а не доза, необходимая для уничтожения микроорганизмов [1]. Негативное воздействие выделяющегося озона на организм человека, повышение токсичности воздуха и прочие факторы не позволяют говорить о полной экологической безопасности этого метода. Ионизация также не может использоваться для эффективного обеззараживания воздуха закрытых помещений, так как длительное использование ионизаторов в помещениях с людьми приводит к увеличению содержания в воздухе озона и окислов азота в концентрациях, превышающих предельно допустимые, и требует качественного и количественного контроля ионного и газового состава воздуха [2]. У фотокаталитических воздухоочистителей также есть свои минусы – они прекрасно справляются с химией, запахами и органическими загрязнениями, но неэффективны в отношении твердых частиц: пыли, пыльцы, шерсти и др., – на которых могут присутствовать микроорганизмы [3].

В настоящее время наиболее распространенным методом, применяемым для микробиологической очистки воздуха в помещениях в присутствии людей, является фильтрация [4]. При использовании метода фильтрации снижается до минимума поступление, генерация и накопление частиц, что достигается подачей в помещение больших объемов воздуха, очищаемого высокоэффективными фильтрами.

Однако высокоэффективные фильтры обеспечивают только тонкую фильтрацию частиц размером до 0,5 мкм и имеют существенные недостатки. Скапливающиеся на фильтре микрочастицы создают благоприятную среду для размножения бактерий. Если в дополнение к этому увеличивается влажность, то фильтр становится инкубатором для

сохранения, роста и размножения бактерий, вирусов и грибов. Таким образом, сам фильтр превращается в угрозу для окружающей среды, так как в фильтрующих системах отсутствует механизм инактивации биологических частиц. Если фильтр не заменить вовремя, то на нем может происходить размножение патогенных микроорганизмов и последующее их распространение потоками воздуха, подаваемого в помещение.

В последние годы разработана и нашла широкое применение в медицине новая технология обработки воздуха «Поток», в результате которой происходит полная инактивация микроорганизмов и вирусов, а также обеспечивается высокий уровень последующей фильтрации чистого воздуха [5]. Данный метод позволяет осуществлять обеззараживание воздушной среды от всех видов микроорганизмов, без негативного влияния на воздушную среду, оборудование и человека. Научно-производственной фирмой «Поток Интер» серийно выпускается установка обеззараживания воздуха (УОВ) «Поток 150-М-01», предназначенная для обеззараживания и тонкой фильтрации воздуха в помещениях с нормируемым уровнем микробной обсемененности. Для использования на борту космических аппаратов установка «Поток 150-М-01» была доработана с учетом требований, предъявляемых к космической технике, и ей был присвоен индекс «Поток 150МК». После испытаний она нашла применение как штатная аппаратура очистки воздуха от аэрозольных частиц и микроорганизмов на заключительном этапе эксплуатации орбитальной станции (ОС) «Мир» (с 1995 г.), а начиная с 2001 г. и по настоящее время – на Международной космической станции (МКС). В данной работе обобщен материал по оценке эффективности работы УОВ «Поток 150МК» почти за 20-летний период пилотируемых полетов.

Методика

Для понимания сути процесса обеззараживания воздуха, прежде всего, необходимо подробнее остановиться на принципе действия технологии «Поток». Он основан на воздействии постоянных электрических полей заданной напряженности и ориентации на микроорганизмы, находящиеся в обрабатываемом воздушном потоке, приводящем к разрушению их структуры.

Обработка воздушного потока в установке осуществляется в 2 этапа (рис. 1). В зоне инактивации (1-й этап) осуществляется комбинированное многократное воздействие на микроорганизмы резко изменяющихся по величине напряженности и градиенту постоянных электрических полей и ионов противоположных знаков, приводящее к повреждению или полному разрушению микробных клеток. Затем в зоне фильтрации (2-й этап) осуществляется улавливание разрушенных микробных клеток и находящегося в обрабатываемом воздушном потоке твердого аэрозоля на электростатическом осадителе.

В процессе микробиологического мониторинга среды ОС «Мир» были получены результаты, которые свидетельствовали о периодических возрастаниях, в том числе до величин, превышающих регламентируемые показатели, количества микроорганизмов в воздухе. Это обстоятельство вызвало необходимость снижения уровня микробной обсемененности воздуха на ОС.

В 1995 г. был принят и введен в действие ГОСТ Российской Федерации Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом аппарате» [6], включающий нормативные требования и регламенты контроля микробиологической обстановки на этапах предполетной подготовки и в процессе полета.

Согласно этому документу, который узаконил ранее разработанные проектные требования и инструктивно-методическую документацию, микробиологическая безопасность газовой среды в обитаемых отсеках космических объектов должна обеспечиваться поддержанием уровня ее микробной обсемененности не выше допустимых показателей:

– для бактерий – 500 колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 м^3;

– для грибов – 100 КОЕ в 1 м^3 – при отсутствии в составе микрофлоры патогенных бактерий и грибов.

Для МКС, согласно документу [7], допустимые показатели вдвое выше для бактерий (1000 КОЕ в 1 м^3) и аналогичные для грибов (100 КОЕ в 1 м^3).

Нормативный уровень микробной обсемененности газовой среды в полете должен поддерживаться за счет работы штатных средств очистки и кондиционирования.

Установка «Поток 150МК» была доставлена на борт ОС «Мир» в период работы 24-й основной экспедиции и размещалась в базовом блоке. Эксплуатация продолжалась с 22 января 1998 г. до окончания работы 28-го экипажа по 6 ч ежедневно с общим временем наработки около 3000 ч.

Санитарно-микробиологические исследования воздушной среды ОС «Мир» проводились на борту в рамках эксперимента МК-35 «Экосфера». С этой целью выполнялся отбор проб воздуха в различных зонах станции с помощью комплекта «Экосфера», предназначенного для определения количественного и видового состава содержащихся в воздухе микроорганизмов. Отборы проб проводили аспирационно-седиментационным методом при помощи пробоотборника SAS Compact на чашки Петри с агаром Хоттингера для выделения бактерий и с агаром Чапека для выделения грибов. Объем проб составлял 90 л для бактерий и 120 л для грибов.

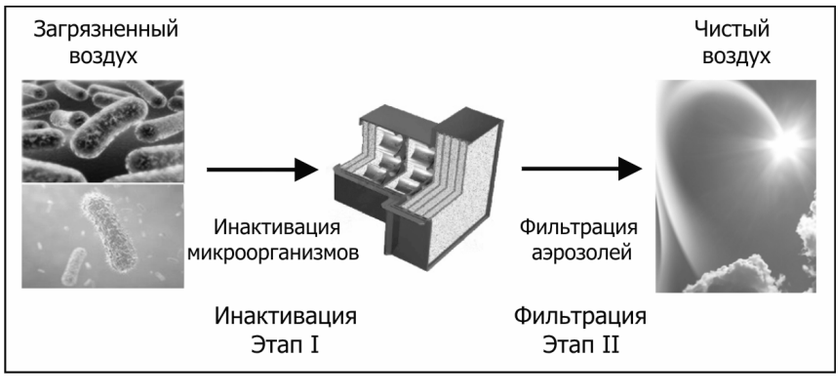


Рис. 1. Принцип работы установки «Поток».
Этап I. Разрушение структуры клеток микроорганизмов воздействием постоянных электрических полей без возможности последующего оживления.
Этап II. В результате воздействия происходит полное уничтожение всех известных видов микроорганизмов и вирусов, а также обеспечивается высокий уровень фильтрации обеззараженного воздуха

Планирование зон отбора проб было связано с задачами конкретного эксперимента. В эксперименте МК-35 эти зоны были определены с таким расчетом, чтобы была возможность получения наиболее полной информации о состоянии микрофлоры газовой среды в базовом блоке, жилом отсеке и пристыкованных модулях, которые в целом составляли ОС «Мир».

Комплекты аппаратуры имелись на борту ОС «Мир», а наборы чашек с питательными средами доставлялись на ОС по мере их расходования грузовыми транспортными кораблями. Исследование микрофлоры воздуха ОС (инкубирование посевов, учет результатов) производилось экипажем непосредственно на борту с передачей полученной информации на Землю по радиоканалам.

Для получения более полного представления о видовой структуре микроорганизмов, а также для выделения тест-культур микроорганизмов с целью формирования коллекций штаммов для дальнейшего исследования производился забор проб воздуха за 1–2 сут до расстыковки с ОС. После этого производилась доставка чашек Петри с посевами микроорганизмов на Землю для дальнейших исследований.

В процессе работы 24-й основной экспедиции на ОС исследования микробной обсемененности воздушной среды были проведены 3 раза. При этом на 80-е и 166-е сутки работы экипажа пробы воздуха отбирались до включения установки «Поток 150МК», а на 196-е сутки – при работе установки. В период работы 25-й основной экспедиции исследования микрофлоры воздуха проводились на 52-е сутки полета. Во время работы 26-й экспедиции отбор проб воздуха проводился на 98-е и 198-е сутки полета.

В 2000 г. было принято решение о применении установки «Поток 150МК» на МКС. Доработанная с учетом пожеланий космонавтов установка была доставлена на орбиту в 2001 г. в период работы 3-й основной экспедиции и установлена в служебном модуле (СМ).

Оценка микробиологического состояния воздушной среды на борту МКС проводилась в рамках эксперимента МО-21 «Микроэкосфера» обычно не реже чем 1 раз в 3 мес.

Отбор проб микрофлоры газовой среды проводился с помощью оборудования «Экосфера», которое, как и на ОС «Мир», включало в себя воздушный пробоотборник SAS и наборы чашек Петри с питательными средами, но измененными для выращивания бактерий: среда № 1, триптон-соевый агар – для выделения бактерий и среда № 2, среда Чапека – для выделения плесневых форм грибов. Чашки доставлялись на МКС по мере их расходования с грузовыми и транспортными кораблями.

Исследования проб воздуха (инкубирование посевов, учет результатов) производился членом экипажа непосредственно на борту с использованием холодильника-термостата «Криогем-03» и с последующей передачей полученной информации на Землю по радиоканалам. В тех случаях, когда отбор проб был в конце срока работы экипажа (за 1–2 сут до расстыковки транспортного корабля с МКС), для получения более полного представления о видовой структуре микроорганизмов производилась доставка чашек Петри с посевами микроорганизмов на Землю.

Во время работы установки «Поток 150 МК» отбор проб был осуществлен на 80-е сутки полета 3-го основного экипажа. В период работы 4-й экспедиции отбор проб проводился 2 раза – на 70-е сутки полета и на 150-е сутки полета 4-го основного экипажа.

Установка функционировала до 26 мая 2001 г., затем, в связи с появившейся неисправностью, была отключена для устранения неполадок. В этот период было проведено несколько серий микробиологических исследований состояния воздушной среды МКС. Во время работы 5-й основной экспедиции отбор проб проводился на 91-е и 156-е сутки полета, а в процессе работы 6-й – на 68-е сутки.

Проведение ремонтных работ по восстановлению работоспособности установки «Поток 150МК» было закончено 10 февраля 2003 г. в период работы 6-й основной экспедиции. После ремонта установки на МКС микробиологические исследования воздушной среды были проведены на 160-е сутки работы 6-го экипажа. В период работы 7-й основной экспедиции

отбор проб проводился на 74-е сутки полета и на 184-е сутки совместного полета 7-го основного экипажа и 5-й экспедиции посещения. С этого периода и по настоящее время установка работает в СМ без замечаний в рабочем режиме по 6 ч в сутки.

Кроме того, в связи с тем, что в процессе работы 14–17-й основных экспедиций было отмечено прогрессирующее ухудшение санитарно-микробиологической обстановки в функционально-грузовом блоке (ФГБ), заключающееся в превышении нормативных показателей по содержанию бактерий и особенно грибов в воздухе и на элементах конструкций, было принято решение о доставке на борт дополнительной УОВ «Поток 150МК». В январе 2009 г. указанная аппаратура была доставлена на станцию, размещена в ФГБ, где и работает по настоящее время в режиме включения на 6 ч в сутки. Начиная с этого периода все последующие пробы отбирались при работе на борту 2 штатных установок микробиологической очистки воздуха «Поток 150МК»: одной – в российском сегменте (РС) СМ, а другой – в американском сегменте (АС) с российским обслуживанием ФГБ.

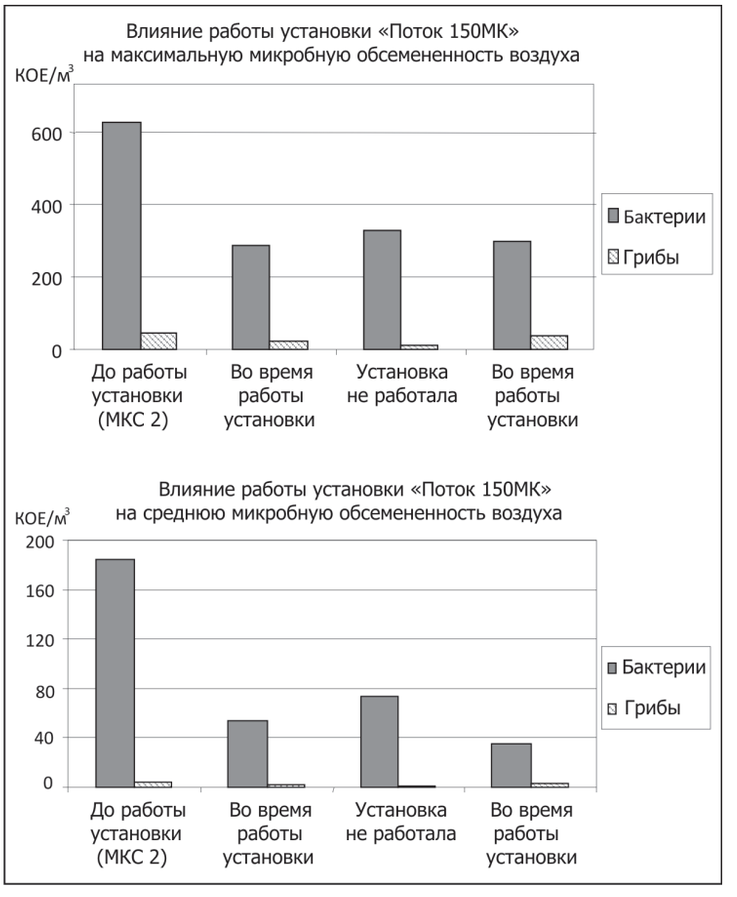


Рис. 2. Уровни микробной обсемененности воздушной среды Международной космической станции

Результаты и обсуждение

УОВ «Поток 150МК» была доставлена на ОС «Мир» в период работы на борту 24-й основной экспедиции, в процессе работы которой отбор микробиологических проб воздуха проводился 3 раза: на 80-е и 166-е сутки пробы воздуха отбирались до включения установки, а на 196-е сутки – при работе установки. В период работы 25-й основной экспедиции исследования микрофлоры воздуха проводились на 52-е сутки полета, а в период работы 26-й экспедиции отбор проб воздуха проводился на 98-е и 198-е сутки полета. Результаты исследований микрофлоры воздушной среды содержания бактерий в воздушной среде ОС «Мир» представлены в табл. 1 и 2.

Как видно из полученных данных, бактериальная обсемененность воздуха до включения УОВ «Поток 150МК» колебалась от 11 до 440 КОЕ в 1 м^3. Во всех зонах отбора проб до включения установки были обнаружены жизнеспособные фрагменты плесневых грибов. Их содержание колебалось от 22 до 462 КОЕ в 1 м^3. Средний уровень контаминации для бактерий составлял 89 КОЕ в 1 м^3, а для грибов – 107 КОЕ в 1 м^3.

После включения УОВ «Поток 150МК» и при последующих отборах проб воздуха содержание микроорганизмов в воздушной среде ОС резко снизилось. В пробах, отобранных в период работы УОВ «Поток 150МК», содержание плесневых грибов колебалось от 11 до 99 КОЕ в 1 м^3. Максимальный уровень обсемененности воздушной среды представителями бактериальной флоры составил 88 КОЕ в 1 м^3. По сравнению с результатами исследований, проведенных до включения УОВ «Поток 150МК», при ее работе уровень контаминации воздушной среды бактериями снизился до средних значений менее 9 КОЕ в 1 м^3. Среднее содержание плесневых грибов снизилось до 4 КОЕ в 1 м^3.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности очистки воздушной среды ОС «Мир» от микроорганизмов с помощью УОВ «Поток 150МК».

Уже в начальный период эксплуатации МКС – с 26 мая 2001 г. по 10 февраля 2003 г., от момента доставки УОВ «Поток 150МК» на борт до выхода ее из строя и повторного включения после устранения неполадок, можно было отчетливо фиксировать ее положительное влияние на санитарно-микробиологическое состояние среды РС МКС (рис. 2).

Сравнивая данные, полученные когда УОВ «Поток 150МК» не работала, с результатами исследований, проведенных при работе установки,

Таблица 1

Обсемененность воздушной среды ОС «Мир» бактериями (число колониеобразующих единиц в 1 м³ воздуха)

Время проведения исследования	До включения установки «Поток 150МК»		При работе установки «Поток 150МК»			
Зоны отбора проб	ЭО-24 80-е сутки	ЭО-24 166-е сутки	ЭО-24 196-е сутки	ЭО-25 52-е сутки	ЭО-26 98-е сутки	ЭО-26 198-е сутки
17 КС, в зоне АСУ	55	55	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, в зоне УКТФ	253	66	Не обнар.	22	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, в зоне стола	22	11	11	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, в зоне велоэргометра	33	11	11	22	Не обнар.	11
17 КС, пост управления № 1	66	33	Не обнар.	33	Не обнар.	Не обнар.
37 КЭ, в центре модуля	22	165	Не обнар.	88	Не обнар.	Не обнар.
77 КСД, в ПГО	121	44	Не обнар.	Не обнар.	11	11
77 КСТ, в ПГО	440	33	Не обнар.	11	Не обнар.	Не обнар.

Примечание. Здесь и в табл. 2: ЭО – основная экспедиция; 17 КС – базовый блок; 37 КЭ – модуль «Квант-1»; 77 КСТ – модуль «Квант-2»; АСУ – ассенизационное устройство; УКТФ – универсальный комплексный тренажер для физической нагрузки; ПГО – переходной грузовой отсек.

Таблица 2

Обсемененность воздушной среды ОС «Мир» плесневыми грибами (число колониеобразующих единиц в 1 м³ воздуха)

Время проведения исследований	До включения установки «Поток 150МК»		При работе установки «Поток 150МК»			
Зоны отбора проб	ЭО-24 80-е сутки	ЭО-24 166-е сутки	ЭО-24 196-е сутки	ЭО-25 52-е сутки	ЭО-26 98-е сутки	ЭО-26 198-е сутки
17 КС, в зоне АСУ	143	33	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	11
17 КС, в зоне УКТФ	132	33	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, в зоне стола	33	33	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, в зоне велоэргометра	297	44	Не обнар.	99	Не обнар.	Не обнар.
17 КС, пост управления № 1	99	99	Не обнар.	11	Не обнар.	Не обнар.
37 КЭ, в центре модуля	154	22	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	11
77 КСД, в ПГО	66	22	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	11
77 КСТ, в ПГО	462	44	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.

можно отметить снижение максимального уровня обсемененности бактериями с 715 до 286 КОЕ в 1 м^3, а грибами – с 44 до 11 КОЕ в 1 м^3.

В период проведения ремонтных работ для восстановления работоспособности УОВ отмечено повышение максимального уровня бактериальной обсемененности до 330 КОЕ в 1 м^3. Среднее содержание бактерий в воздушной среде МКС также повысилось по сравнению с данными, полученными во время работы установки, – с 53 до 73 КОЕ в 1 м^3. Тем не менее средняя микробная обсемененность воздуха в период ремонта установки оказалась ниже, чем до включения УОВ «Поток 150МК». Средний уровень контаминации бактериями на 80-е сутки 3-го основного экипажа (до включения установки) составлял 185 КОЕ в 1 м^3 (см. рис. 2).

Максимальные количественные уровни содержания плесневых грибов также уменьшились после включения УОВ «Поток 150МК» (с 44 до 22 КОЕ в 1 м^3). Средние значения обсемененности грибами снизились с 5 до 2 КОЕ в 1 м^3 при работе установки и продолжали оставаться низкими в период ремонта – менее 1 КОЕ в 1 м^3.

После восстановления установки на борту МКС отмечено общее снижение уровней контаминации воздуха бактериями. Их содержание составляло от 8 до 297 КОЕ в 1 м^3. Среднее значение обсемененности воздушной среды представителями бактериальной флоры снизилось с 73 до 36 КОЕ в 1 м^3.

В настоящее время на МКС в штатном режиме работают 2 установки «Поток 150МК», расположенные в 2 модулях (СМ и ФГБ), что позволяет постоянно поддерживать оптимальное санитарно-микробиологическое состояние воздушной среды и обеспечивать защиту членов экипажа от негативного влияния микробного фактора. Очень важно отметить, что после начала работы 2 УОВ «Поток 150МК» в процессе микробиологического мониторинга воздушной среды ни в одном модуле, контролируемом российской стороной, не было зафиксировано превышения нормативного показателя по количеству бактерий и грибов.

Тем не менее полученный многолетний опыт исследований состояния микрофлоры среды обитания пилотируемых ОС свидетельствует о том, что в составе микроорганизмов, помимо представителей аутомикрофлоры человека, значительный удельный вес занимают обитатели природных резервуаров, и прежде всего спорообразующие бациллы и микроскопические грибы. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости совершенствования санитарно-гигиенических мероприятий на этапах подготовки экипажей и космических объектов (включая транспортные орбитальные средства, обеспечивающие доставку космонавтов и грузопотоки на ОС). И здесь существенную роль может сыграть использование установок «Поток 150 М 01».

В целях усовершенствования существующей системы санитарно-гигиенического и противоэпидемического обеспечения пилотируемых ОС и разработки дополнительных средств защиты от воздействия микроорганизмов не только в процессе КП, но и на стадии подготовки космических объектов, включая осуществление грузопотока, в 2003 г. был совместно разработан ГНЦ РФ – ИМБП РАН и ООО НПФ «Поток Интер» и утвержден ФМБА России отраслевой нормативный документ «Методические указания по использованию установки обеззараживания воздуха «Поток 150 М 01» в производственных помещениях в целях обеспечения биологической чистоты модулей, транспортных кораблей и грузов на этапах проведения предстартовых работ» [8].

Данная технология также может найти применение для обеспечения планетарного карантина при осуществлении межпланетных КП. Признавая практическую невозможность полной стерилизации аппарата, который будет садиться на другую планету, следует принять максимальный комплекс мер для снижения его микробной обсемененности в соответствии с требованиями. Одной из основных мер, позволяющих значительно снизить микробную загрязненность открытых поверхностей, является использование чистых помещений при сборке космического корабля.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что установки на основе технологии «Поток» являются надежными и эффективными для обеспечения микробиологической чистоты объектов различного назначения и могут широко использоваться в практическом здравоохранении и космической медицине.

Выводы

1. Результаты многолетних микробиологических исследований, проведенных на борту ОС «Мир» и МКС, показали, что установки обеззараживания воздуха «Поток 150МК» являются эффективным средством обеспечения биологической чистоты и безопасности воздуха. Они осуществляют инактивацию микроорганизмов, формирующих микрофлору среды обитания пилотируемых космических аппаратов и позволяют поддерживать нормируемое санитарно-микробиологическое состояние воздушной среды.

2. На основании имеющихся данных исследований эффективности работы установок обеззараживания воздуха «Поток» и практического опыта их применения можно рекомендовать их для обеспечения микробиологической безопасности воздушной среды не только в процессе КП, но и на стадии их подготовки, а также в других отраслях промышленности.

3. Данное оборудование может найти применение в медицинских учреждениях, микробиологических лабораториях, на транспорте, в общественных местах; целесообразно использование этих установок в системах вентиляции, кондиционирования и рециркуляции воздуха зданий и сооружений различного назначения.

4. В космической отрасли представляется перспективным использование установок обеззараживания воздуха «Поток» для создания чистых помещений и чистых рабочих зон при сборке беспилотных космических кораблей в соответствии с требованиями планетарного карантина при полетах на другие планеты.

Работа выполнена при поддержке контракта «МКС (Эксплуатация)».

Список литературы

1. Методические указания по применению бактерицидных ламп для обеззараживания воздуха и поверхностей в помещениях // Светотехника. М., 1995. № 6. С. 2–19.

Guidelines for the use of germicidal lamps for disinfection of air and surfaces in premises // Svetotekhnika. Moscow, 1995. № 6. P. 2–19

2. *Новиков Н.Н.* Аэроионизаторы – люстра Чижевского (краткая характеристика) // Медицинское оборудование и инструментарий. М., 2001. № 5 (47). С. 6–7.

Novikov N.N. Air ionizers – Chizhevsky lamp (short description) // Meditsinskoye oborudovanie i instrumentariy. Moscow, 2001. №5 (47). P. 6–7.

3. *Knorr D., Heinz V.* Development of nonthermal methods for microbial control // Disinfection, sterilization and preservation / S.S. Block, ed. 5th ed. Philadelphia, 2001. P. 853–880.

4. *Дробеня В.В., Ткачев С.В.* Бактериоулавливающая и бактериостатическая эффективность фильтров для оценки воздуха // Гигиена и санитария. М., 1988. № 11. С. 90–92.

Drobenya V.V., Tkachev S.V. Absorbing bacteria and bacteriostatic effectiveness of filters for air purification // Gigiena i sanitariya. Moscow, 1988. № 11. P. 90–92.

5. *Капустина Е.А., Володина Е.В.* Установка обеззараживания и тонкой фильтрации воздуха «Поток 150МК» // Авиакосм. и экол. мед. М., 2004. № 2. Т. 48. С. 57–58.

Kapustina E.A., Volodina E.V. Installation for disinfecting and fine filtration of the air «Potok 150MK» // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. M., 2004. № 2. V. 48. P. 57–58.

6. ГОСТ РФ. Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. М., 1995.

GOST RF. R 50804-95. Cosmonaut's habitat in manned spacecraft. General medical and technical requirements. Moscow, 1995.

7. International Space Station Medical Operations Requirements Documents (SSP 50260 MORD). May. 2000.

8. *Поддубко С.В., Новикова Н.Д., Наголкин А.В., Капустина Е.А.* Нормативный отраслевой документ – «Методические указания по использованию установки обеззараживания воздуха «Поток 150-М-01» в производственных помещениях в целях обеспечения биологической чистоты модулей, транспортных кораблей и грузов на этапах проведения предстартовых работ». Федеральное управление Медбиоэкстрем. М., 2003.

Poddubko S.V., Novikova N.D., Nagolkin A.V., Kapustina E.A. Industry Norm – «Guidelines for the use of air disinfection installation «Potok 150-M-01» in the production facilities in order to ensure the biological purity of the modules, transport vehicles and cargos at the pre-launch stage». Federal Directorate Medbioekstrem. Moscow, 2003.

Поступила 07.12.2015

RESUME AND PROSPECTS FOR INTEGRATION IN SPACE MEDICINE OF THE MICROBIOLOGICAL AIR PURIFICATION TECHNOLOGY WITH THE USE OF SYSTEMS «POTOK»

Novikova N.D., Poddubko S.V., Deshevaya E.A., Nagolkin A.V., Volodina E.V., Zagidullov M.F.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 10–16

Results of the long-standing microbiological investigations onboard the orbital complexes «Mir» and International space station showed that air decontaminating system (ADS) «Potok 150MK» have been capable to provide air biological cleanness and safety. The system inactivates microorganisms that form microflora of the human environment in space vehicles and controls air parameters within the established sanitary-microbiological limits. In space industry, ADS «Potok» could be used to the advantage not only of long-duration piloted missions, but also on the stage of pre-launch preparations of cargo and transport vehicles or assembly of robotic spacecrafts to meet the planetary quarantine requirements in interplanetary missions.

Key words: space vehicle environment, microorganisms, air decontamination, «Potok» technology.

УДК 629.7+519.233.5

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ВИТАМИННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОРАНЖЕРЕИ

Коновалова И.О.[1], Беркович Ю.А.[1], Ерохин А.Н.[1], Смолянина С.О.[1], Яковлева О.С.[2], Знаменский А.И.[2], Тараканов И.Г.[2], Радченко С.Г.[3], Лапач С.Н.[3], Трофимов Ю.В.[4], Цвирко В.И.[4]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва
[3]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина
[4]Государственное предприятие «ЦСОТ НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь

E-mail: q666666@yandex.ru

В работе описан светодиодный облучатель с цифровым управлением для витаминной космической оранжереи, выполненный на основе белых (цветовая температура 4000 К) и красных (660 нм) светодиодов. Разработанный облучатель позволяет регулировать интенсивность излучения от 0 до 6000 μМ/(м²·с), частоту импульсного излучения в диапазоне от 0,5 до 30 кГц и доли красного и белого света в спектре. В ходе дробного 3-факторного эксперимента с растениями китайской капусты общей длительностью 14 832 ч не было отмечено расхождений между реальными и заданными значениями параметров освещения, установленных в разработанном облучателе. По результатам эксперимента построены регрессионные зависимости продуктивности посева китайской капусты и содержания аскорбиновой кислоты в побегах от параметров светового режима и уточнен критерий для выбора оптимального режима освещения растений в витаминной космической оранжерее.

Ключевые слова: космическая оранжерея, светоизлучающие диоды, спектральный состав света, импульсное освещение, продуктивность посева, аскорбиновая кислота, регрессионный анализ, планирование эксперимента.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 17–22.

По мнению ряда специалистов, наиболее перспективным биологическим звеном в биолого-технических системах жизнеобеспечения (БТСЖО) пилотируемых космических аппаратов в ближайшие десятилетия могут быть относительно небольшие овощные космические оранжереи (КО) с энергопотреблением не более 10 кВт [1, 2]. Удачная конструкция системы освещения и обоснованный выбор режима освещения растений играют ключевую роль для экономичного и безопасного функционирования КО в составе БТСЖО космического корабля [3]. Наиболее важными параметрами режима освещения являются следующие:

1. Величина плотности потока фотонов (ППФ) в диапазоне значений ниже уровня светового насыщения. Диапазон значений ППФ, в котором стимулирующий эффект света на рост растений наиболее выражен, составляет обычно от 200–250 μМ/(м²·с) до 500–800 μМ/(м²·с). Для растений китайской капусты экспериментально установленный насыщающий уровень ППФ составил около 670 μМ/(м²·с) [4, 5].

2. Спектральный состав света. Увеличение доли красной составляющей в спектре может увеличить урожай листовых овощей на единицу световой энергии, так как в этой области находятся максимумы поглощения хлорофиллов *а* и *в* (662 и 642 нм соответственно). Однако сильно редуцированный относительно солнечного спектра световой поток не всегда обеспечивает нормальный рост и онтогенез растений [6, 7].

3. Фотопериод, влияющий как на рост биомассы растений, так и на накопление вторичных метаболитов [8]. В витаминных КО для выращивания зеленных растений применяют, как правило, круглосуточное освещение

4. Характер излучения. В ряде работ было продемонстрировано, что свет, подаваемый в коротких (порядка мкс) интенсивных импульсах, может стимулировать фотосинтез и рост растений по сравнению с непрерывным излучением при одинаковой, усредненной по времени, мощности светового потока [7, 9].

В целом, накопленные к настоящему моменту данные светофизиологии растений не позволяют рассчитывать оптимальные режимы освещения посевов в КО без предварительных экспериментов. Одним из эффективных методов экспериментальной оптимизации режима освещения растений может служить построение многомерных регрессий наиболее значимых показателей растений (критериев качества, или откликов) на параметры режима освещения по результатам ортогонального многофакторного эксперимента, позволяющего

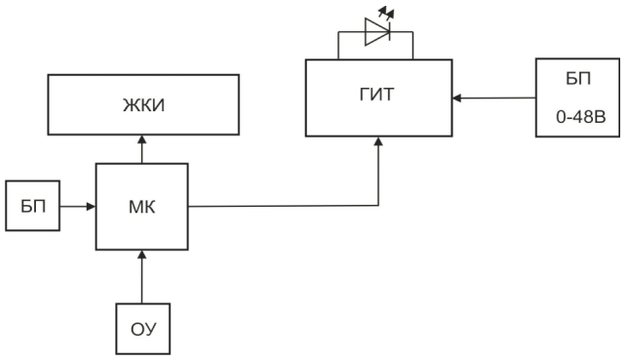


Рис. 1. Структурная схема генератора импульсного питания светодиодов.
БП – блок питания модуля управления; МК – микроконтроллер; ОУ – органы управления; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; ГИТ – генератор импульсов тока, 2-канальный; БП 0-48В – блок питания ГИТ

минимизировать количество экспериментальных точек при заданном уровне остаточной дисперсии модели [10].

Целью данной работы явилось экспериментальное обоснование параметров режима освещения, позволяющих оптимизировать продуктивность и качество зеленных культур в витаминной космической оранжерее.

Методика

Оборудование. Для исследования воздействия режимов освещения на посевы растений листовых овощей применительно к витаминной КО совместно со специалистами «Центра светодиодных и оптоэлектронных технологий» Национальной академии наук Беларуси («ЦСОТ НАН Беларуси») был сконструирован и изготовлен импульсный облучатель на основе светоизлучающих диодов (СД). Облучатель включает в себя 4 светодиодных модуля, каждый из которых снабжен генератором импульсов питания СД (ГИПС) с цифровым управлением. Светодиодные модули содержат 2 цепочки СД, равномерно распределенных по поверхности модуля, выводы которых подключаются к 2 независимым каналам источника тока. СД сгруппированы в 16 групп (пикселов), в каждой из которых содержится 2 СД: белый (LXH7-PW40, Philips Lumileds) и красный (ELSH-Q91E1-0LPNM-JD3D8, Everlight). На каждый пиксель установлен отражатель (серия Brooke, Ledil) с углом вывода излучения около 50° для перемешивания излучения от различных СД и уменьшения потерь излучения. Спектры излучения СД приведены в работе [11]. Светодиодный модуль в импульсном режиме работы обеспечивает мгновенные уровни ППФ в центре светового пятна на расстоянии 70 мм не менее 5000 и 3000 μМ/(м^2·с) от группы белых и красных СД соответственно.

ГИПС представляет собой устройство с микроконтроллерным управлением и ЖКИ-дисплеем, позволяющее установить амплитуду импульса тока, длительность импульса, период следования импульсов, а также задать число импульсов и продолжительность серии импульсов (рис. 1). В ГИПС предусмотрено 2 источника питания: для цифровой части схемы, потребляющей относительно небольшой ток, и для генератора импульсов тока. Такая схема позволяет обеспечить для цепи питания СД достаточно широкий рабочий диапазон напряжения прямого смещения, поскольку возможны комбинации различного количества СД без нарушения питания цифровой схемы. В качестве органа управления применен N-кодер, обеспечивающий регулировку задаваемых значений, аналогичную аналоговой регулировке. Вал N-кодера совмещен с тактовой кнопкой, что повышает функциональность узла и позволяет обойтись без дополнительных клавиш. Для запуска ГИПС предусмотрена отдельная кнопка, что позволяет исключить случайное включение генератора из меню установок. В программном обеспечении микроконтроллера предусмотрено задание максимального тока для каждого канала, что обеспечивает дополнительную защиту СД от ненамеренного включения в недопустимом режиме. Предложенная схема обеспечивает высокий КПД генератора импульсов при разности опорного напряжения и напряжения, требующегося для обеспечения необходимой величины тока в данной цепочке СД, до 0,5 В.

Светотехнические испытания светодиодного облучателя включали измерения спектральных характеристик и импульсов тока питания СД в разных режимах. При постоянном токе максимальные значения прямого тока составили 1000 и 400 мА для белых и красных СД соответственно. При проведении биолого-технических испытаний светодиодные модули устанавливали в климатические камеры с регулируемыми параметрами среды и устройствами для выращивания растений [11].

Разработка регрессионной модели. Как известно из теории математического программирования, для решения задач оптимизации необходим выбор критериев оптимальности и параметров оптимизации. Основными критериями оптимальности для витаминной КО в данном эксперименте были выбраны продуктивность посева по сухой массе и концентрацция аскорбиновой кислоты в съедобной биомассе. Параметры оптимизации и допустимая область их значений были выбраны на основании анализа научной литературы по выращиванию листовых овощей в светокультуре [4–8]:

– суммарная плотность светового потока, $ППФ_{\Sigma}$, падающего на растения (фактор X1), уровни 260, 340, 420 и 500 μМ/(м^2·с);

– отношение уровней ППФ красных и белых СД (фактор X2), уровни 0; 0,5; 1,0; 1,5;

Таблица 1

Рабочая матрица плана эксперимента $4^3/16$

№ опыта	X_1	X_2	$X_{3ф}$	$X_{1,3ф}$
1	260	0	1	30
2	420	0	3	204,4
3	500	0	4	186,7
4	340	0	2	151,9
5	260	1	3	343,4
6	420	1	1	30
7	500	1	2	82,3
8	340	1	4	395,8
9	260	1,5	4	501
10	420	1,5	2	117,2
11	500	1,5	1	30
12	340	1,5	3	273,9
13	260	0,5	2	186,7
14	420	0,5	4	291,5
15	500	0,5	3	134,6
16	340	0,5	1	30

Примечание. Фактор $X_{1,3ф}$ коррелирован с фактором X_1, Вычисленное значение коэффициента корреляции: r ($X_{1,3ф}$, X_1) = -0,42412. Для расчета моделей используются столбцы X_1, X_2, $X_{3ф}$, а для проведения эксперимента – столбцы X_1, X_2, $X_{1,3ф}$.

– частота и скважность подаваемых от облучателя световых импульсов (фактор X3), уровни выбраны по специальной схеме.

Значение усредненной по времени $ППФ_\Sigma$ определяется 2 факторами – пиковым значением ППФ в световом импульсе и скважностью подаваемых на СД импульсов электропитания:

$$ППФ_\Sigma = ППФмакс \cdot t/r , \quad (1)$$

где ППФмакс – пиковое значение ППФ в световом импульсе, мкМ/(м²·с); t – длительность светового импульса, мкс; r – период следования импульсов, мкс.

Для нашей ситуации, когда фактор X3 коррелирован с фактором X1, был использован метод построения рабочей матрицы ортогонального 3-факторного эксперимента с представлением уровней варьирования не фактора X3, а связанного с ним фиктивного фактора $X3_ф$, с использованием алгоритма RASTA 13 и с соответствующей программной поддержкой [10, 12, 13]. На основании теории многофакторного оптимального планирования эксперимента была выбрана полиномиальная структура трехмерной регрессионной модели с квазиортогональными эффектами. В качестве плана эксперимента был выбран многофакторный регулярный (робастный) план 43/16: 3 фактора, каждый из которых меняется на 4 уровнях, всего 16 опытов (табл. 1). План эксперимента позволяет оценить все главные эффекты ортогонально друг к другу, а также слабо коррелированные (коэффициенты парной корреляции < 0,4) необходимые взаимодействия.

Подготовка растительного материала. Процедура выращивания растений подробно описана в работе [11]. Объектом исследований были растения китайской капусты *Brassica chinensis* L., сорт Веснянка, селекции ВНИИССОК. Растения выращивали в климатической камере при температуре 30 ± 1 °С и фотопериоде 24 ч в течение 24 сут, затем срезали надземную часть, взвешивали срезанные растения индивидуально, объединяли, измельчали ножницами и отбирали по 4 навески (по 2,0 г) для определения содержания сухого вещества и аскорбиновой кислоты. Содержание сухого вещества определяли, высушивая измельченные листья до постоянного веса при 80 °С. Концентрацию аскорбиновой кислоты в листьях определяли титриметрическим методом по ГОСТу 24556-89. Полученные данные обрабатывали с помощью программы ПРИАМ [13]; статистические гипотезы проверяли при уровне значимости α = 0,05.

Результаты и обсуждение

Светотехнические испытания светодиодного облучателя. Максимальные значения ППФ на расстоянии 10 см от нижней кромки отражателей на светодиодных модулях составили около 4550 и 1650 мкМ/(м²·с) для белых и красных СД соответственно. Таким образом, при соответствующей интенсивности охлаждения разработанный облучатель может обеспечить излучение с суммарной ППФ до 6000 мкМ/(м²·с) при питании СД постоянным током максимально возможной величины. Цифровая система управления обеспечивала регулирование величины суммарной ППФ и соотношения значений ППФ от красных и белых СД с точностью до 2 и 5 % соответственно.

Таблица 2

Показатели 16-дневных растений китайской капусты, выращенных под светодиодным облучателем и натриевой лампой высокого давления

Показатели	Светодиодный облучатель	Натриевая лампа
Сырая масса, г/побег	10 ± 4	9 ± 3
Содержание сухих веществ, %	7,8 ± 0,8	9,0 ± 1,1
Удельная поверхностная плотность листа, мг сырой массы/см^2	63 ± 4	75 ± 5
Содержание хлорофилла, мг/г сырой массы, в том числе Хл. а Хл. в	0,92 ± 0,18 0,70 ± 0,14 0,21 ± 0,04	0,57 ± 0,04 0,43 ± 0,04 0,14 ± 0,01
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы	0,19 ± 0,03	0,19 ± 0,01

Примечание. Параметры среды зафиксированы на уровнях: ППФ – 420 ± 10 μМ/(м^2×с), температура воздуха – 30 ± 1 °С, относительная влажность воздуха – 50 ± 2 %. Светодиодный облучатель работал в режиме непрерывного излучения при равных долях излучения от красных и белых СД.

Амплитуды токов могли быть заданы в интервале от 10 до 1000 мА независимо для цепей красных и белых СД. Так же независимо для красных и белых СД могли быть заданы длительности световых импульсов в интервале от 10 мкс до продолжительности периода следования импульсов, т. В описываемом эксперименте длительность световых импульсов от всех СД была зафиксирована на уровне 30 мкс. Период следования импульсов мог быть установлен в диапазоне от 30 до 2000 мкс, что соответствовало диапазону частот от 30 до 0,5 кГц. Импульс тока имел форму, близкую к прямоугольной, суммарная протяженность фронтов нарастания и спада сигнала составила не более 2 % от продолжительности периода следования импульсов. В импульсном режиме работы зависимость величины ППФ от частоты и длительности светового импульса была линейной во всем диапазоне возможных значений периода следования импульса.

Биолого-технические испытания светодиодного облучателя. Предварительные опыты по выращиванию растений под светодиодным облучателем или натриевой лампой высокого давления ДНаТ-400 не выявили значимых различий между вариантами по большинству показателей, а по содержанию хлорофилла растения в «светодиодном» варианте в 1,5 раза превосходили растения, выращенные под натриевой лампой (табл. 2). Эти данные показывают, что разработанный облучатель может генерировать излучение, адекватное потребностям растений. В ходе основной серии вегетационных опытов, выполненных в соответствии с рабочей матрицей эксперимента (см. табл. 1), испытываемый облучатель эксплуатировался в течение 14 832 ч, в том числе 5088 ч – в режиме непрерывной работы. В течение всего периода испытаний не было отмечено каких-либо внештатных ситуаций или расхождений между реальными и заданными значениями параметров светового режима.

Построение регрессионных моделей продукционных и биохимических показателей посева. Структура статистической модели была выбрана как часть модели полного факторного эксперимента с ортогональными (или близкими к ортогональным) статистически значимыми структурными эффектами:

$$(1 + x_1 + z_1 + v_1)(1 + x_2 + z_2 + v_2)(1 + x_3 + z_3 + v_3) \rightarrow N_П, \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3 – линейные ортогональные контрасты факторов X_1, X_2, X_3, z_1, z_2, z_3 – квадратичные ортогональные контрасты факторов X_1, X_2, X_3, v_1, v_2, v_3 – кубические ортогональные контрасты факторов X1, X_2, X_3, $N_П$ – число структурных элементов полного факторного эксперимента.

Для того, чтобы фактор X_3, коррелированный с факторами X_1 и X_2, был ортогонален к ним, он был представлен в виде 2 факторов: физического $X_{1,3ф}$ и фиктивного $X_{3ф}$. Выражение для $X_{1,3ф}$ имело следующий вид:

$$X_{1,3ф} = 186{,}856 + 156{,}904x_{3ф} - 78{,}5732x_1 - 78{,}6497x_1x_{3ф}, \quad (3)$$

где $x_1 = 0{,}00828157(X_1 - 380{,}25)$, $x_{3ф} = 0{,}666667(X_{3ф} - 2{,}5)$.

Значения периода световых импульсов рассчитывали согласно выражению (3), задавая значения X_1 и $X_{3ф}$.

Регрессионные модели для сухой массы побегов (г/м^2 светящей поверхности) и для концентрации аскорбиновой кислоты (мг/г сухой массы) описаны выражениями y_1 (4) и y_2 (5) соответственно:

$$y_1 = 220{,}355 + 64{,}8117 \cdot x1 + 42{,}1119 \cdot x1 \cdot z3 + \\ + 22{,}9492 \cdot z1 \cdot x3 + 7{,}43767 \cdot z2 - 15{,}2288 \cdot x3, \quad (4)$$

$$y_2 = 10{,}0927 + 1{,}34942 \cdot z1 \cdot x2 - 1{,}08664 \cdot z1 \cdot z3, \quad (5)$$

где x1 = 0,00833333 · (X1 - 380); z1 = 2,25 · ((x1^2)

- 0,555556); x2 = 1,33333 · (X2 - 0,75); z2 = 2,25 · ((x2^2) - 0,555556); x3 = 0,00318307 · (X3 - 186,837); z3 = 1,97202 · ((x3^2) - 0,300503 · x3 - 0,192403).

Анализ статистических характеристик построенных моделей показал, что обе модели являются адекватными и информативными. Средняя погрешность аппроксимации составила 5,1 и 8,4 % для моделей (4) и (5) соответственно. Полученные модели позволили найти световые режимы, обеспечивающие максимум сухой массы посева и максимум концентрации аскорбиновой кислоты. Максимум сухой массы посева достигается в 2 точках: при ППФ = 480 ± 20 μМ/(м²·с), т = 501 мкс и отношении уровней ППФ красных и белых СД равном 0 и 1,5. Максимум концентрации аскорбиновой кислоты достигается при ППФ = 380 ± 20 μМ/(м²·с), т = 501 мкс и отношении уровней ППФ красных и белых СД равном 0. Примеры зависимостей сухой биомассы и концентрации аскорбиновой кислоты от параметров светового режима представлены на рис. 2.

Поскольку координаты максимумов продуктивности посева и концентрации аскорбиновой кислоты в выращенной биомассе не совпадают, целесообразно сформировать единый критерий оптимизации светового режима, учитывающий как общую продуктивность посева, так и содержание целевого продукта (аскорбиновой кислоты) в съедобной биомассе, а также удельные затраты световой энергии на единицу биомассы урожая. Было предложено следующее выражение для критерия:

$$Q_в = (C_A \cdot M)\ M/E, \qquad (6)$$

где M – прирост сухой биомассы посева за время эксперимента, C_A – содержание аскорбиновой кислоты в сухой массе посева, E – энергия светового потока, падающего на посев за время эксперимента.

Расчет максимума выбранного критерия позволит определить оптимальный режим светодиодного освещения растений в витаминной космической оранжерее.

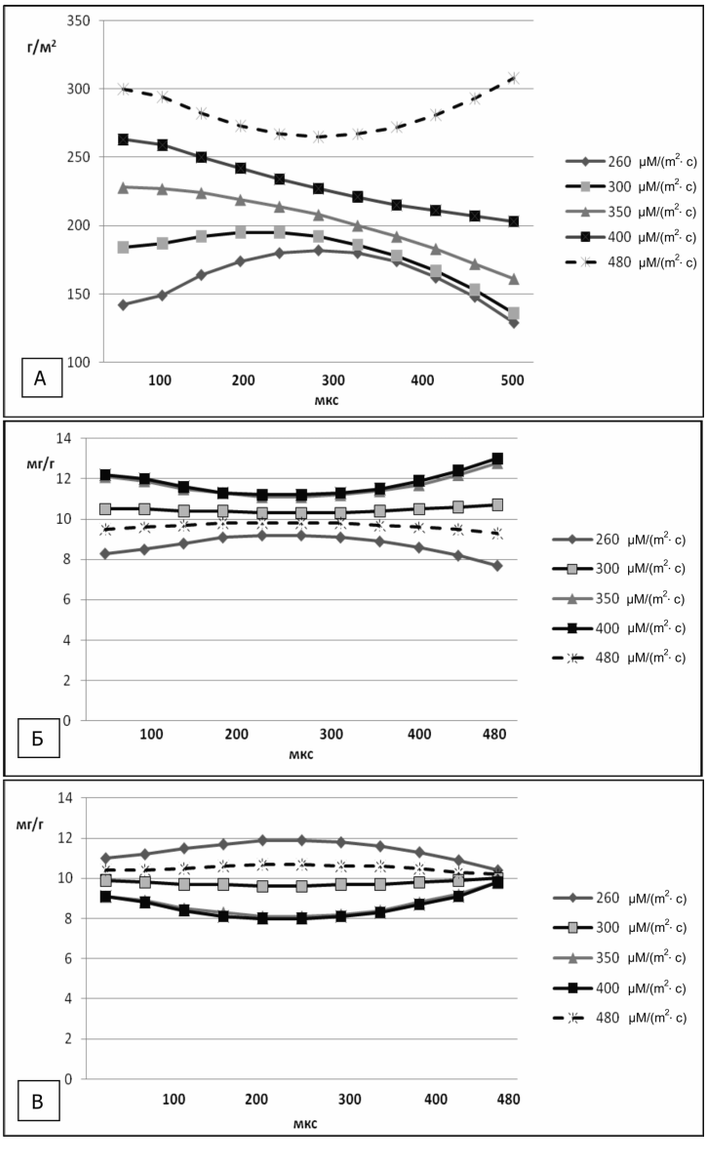


Рис. 2. Сечения поверхностей отклика показателей продуктивности посевов листовой капусты на варьирование параметрами режима освещения.
А – зависимость сухой массы посева, г/м² светящей поверхности, от плотности потока фотонов и периода следования импульсов при освещении белыми СД; Б – зависимость концентрации аскорбиновой кислоты в побегах, мг/г сухой массы, от плотности потока фотонов и периода следования импульсов при освещении белыми СД; В – зависимость концентрации аскорбиновой кислоты в побегах, мг/г сухой массы, от плотности потока фотонов и периода следования импульсов при освещении красными и белыми СД при отношении 1,5:1

Выводы

Разработанный светодиодный облучатель на основе теплых белых и красных светодиодов генерирует импульсное световое излучение в диапазоне частот 0,5–30 кГц. Цифровая система управления позволяет регулировать интенсивность, спектр и частоту импульсного излучения. Во всем диапазоне возможных значений наблюдается линейная зависимость средней интенсивности излучения от длительности импульса тока и частоты следования импульсов.

На поверхностях отклика выбранных критериев оптимальности (концентрации аскорбиновой кислоты в съедобной биомассе и сухой массы посева) на

варьирование параметрами режима освещения выявлено несколько различных максимальных значений для обоих критериев. Для выбора оптимального режима освещения предложен единый критерий оптимизации светового режима в виде максимума произведения квадрата биомассы посева на содержание в ней аскорбиновой кислоты, деленного на затраченную для выращивания посева световую энергию.

Список литературы

1. *Беркович Ю.А., Синяк Ю.Е., Смолянина С.О. и др.* Энергетические потребности для производства растительной пищи в длительных пилотируемых космических экспедициях // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 27–35.

Berkovich Yu.A., Sinyak Yu.E., Smolyanina S.O. et al. Energy consumption for space plant food growing during long-term manned space missions // Izv. RAN. Energetika. 2009. № 1. P. 27–35.

2. *Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А. и др.* Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций // Там же. 2007. № 3. С. 57–74.

Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A. et al. Life support systems for crews on long-duration interplanetary missions // Ibid. 2007. № 3. P. 57–74.

3. *Massa G.D., Emmerich J.C., Morrow R.C. et al.* Plant-growth lighting for space life support: a review // Gravit. and Space Biology. 2006. V. 19. № 2. P. 19–29.

4. *Li Z.Z., Gong S.F.* Vertical column and system of columnar soilless culture (SCSC) and its application to cultivation of lettuce // Chin. J. Appl. Environ. Biol. 2002. V. 8. P. 142–147.

5. *Tatsumi M., Hori Y.* Studies on photosynthesis of vegetable crops // Hort. Res. Stn., Jpn. 1969. A8. P. 127–140 [In Japanese with English summary], цит. по Tazawa S. Effects of various radiant sources on plant growth (Part 1) // Japan. Agric. Res. 1999. Q. 33. P. 163–176.

6. *Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D. et al.* The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Scientia Horticulturae. 2013. V. 150. P. 86–91.

7. *Yoneda K., Mori Ya.* Method of cultivating plant and illumination for cultivating plant. Patent EP 1 374 665 A1. 2004.

8. *Lefsrud M.G., Kopsell D.A., Auge R.M., Both A.J.* Biomass production and pigment accumulation in kale grown under increasing photoperiods // Hort. Science. 2006. V. 41. P. 603–606.

9. *Olvera-Gonzalez E., Alaniz-Lumbreras D., Ivanov-Tsonchev R. et al.* Chlorophyll fluorescence emission of tomato plants as a response to pulsed light based LEDs // Plant Growth Regulation. 2013. V. 69. P. 117–123.

10. *Радченко С.Г.* Методология регрессионного анализа. Киев, 2011.

Radchenko S.G. Methodology of regression analysis. Kiev, 2011.

11. *Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Смолянина С.О. и др.* Влияние параметров светового режима на накопление нитратов в надземной биомассе капусты китайской (*Brassica chinensis* L.) при выращивании со светодиодными облучателями // Агрохимия. 2015. № 11. С. 63–70.

Konovalova I.O., Berkovich Yu.A., Smolyanina S.O. et al. The effect of light regime parameters on nitrate accumulation in above-ground biomass of Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) plants grown with LED illumination // Agrokhimiya. 2015. № 11. P. 63–70.

12. *Лапач С.Н., Чубенко А.В., Бабич П.Н.* Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel. Киев, 2001.

Lapach S.N., Chubenko A.V., Babich P.N. Statistical methods in biomedical research using Excel. Kiev, 2001.

13. *Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н.* Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) // Каталог программных продуктов Украины. 1993. С. 24–27.

Lapach S.N., Radchenko S.G., Babich P.N. Planning, analysis and regression of PRIAM models // Catalog programmnykh produktov Ukrainy. 1993. P. 24–27.

Поступила 02.02.2016

OPTIMIZATION OF A LIGHT-EMITTING DIODE-BASED ILLUMINATION SYSTEM OF A VITAMIN SPACE GREENHOUSE

Konovalova I.O., Berkovich Yu.A., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Yakovleva O.S., Znamensky A.I., Tarakanov I.G., Radchenko S.G., Lapach S.N., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 17–22

The paper describes a digitally-controlled light-emitting diode illuminator for a vitamin space greenhouse combining white (color temperature 4000 K) and red (660 nm) diodes. The illuminator controls emission intensity within the range of 0 to 6000 μM/(m²·s), pulsed radiation frequency within 0.5 to 30 kHz, and ratios of the red and white spectra. A fractional 3-factor experiment with Chinese cabbage crops with total duration of 14 832 hours failed to reveal differences between actual and preset parameters of illumination. Results of the experiment were used to construct regression dependences of Chinese cabbage yield and ascorbic acid content of sprouts on illumination conditions and to reconsider criteria of choosing optimal illumination for plants in the vitamin greenhouse.

Key words: space greenhouse, light-emitting diodes, spectral light composition, pulsed illumination, crop productivity, ascorbic acid, regression analysis, planning of an experiment.

УДК 629.786.2:614.876

ЭФФЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИЕЙ КОСМОНАВТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г.

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

E-mail: vg_mit@imbp.ru

При обеспечении радиационной безопасности космонавтов требуется определение эффективной эквивалентной дозы не только за время пребывания космонавтов внутри Международной космической станции (МКС), но и при выполнении ими внекорабельной деятельности (ВКД). В настоящее время расчетный путь дает единственную возможность для корректной оценки радиационного воздействия как на космонавтов, так и на отдельные органы и системы. В работе рассмотрены вопросы расчетного моделирования радиационного воздействия на космонавтов при осуществлении ВКД из российского сегмента МКС. Представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных для датчиков Пилле, используемых при получении оценки дополнительной поглощенной дозы за время ВКД. Показано, что определение дозовой нагрузки на космонавтов путем вычитания из показаний датчиков Пилле, использованных при ВКД, показаний контрольного датчика приводит к ошибочной оценке поглощенной дозы космонавтами. Даны практические рекомендации по получению оценок дополнительной радиационной нагрузки на космонавтов за время проведения ВКД и оценки эквивалентных доз при выполнении космонавтами первых 48 выходов в открытый космос.

Ключевые слова: Международная космическая станция, внекорабельная деятельность, ионизирующие излучения, облучение космонавтов, поглощенная доза, функции экранированности.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 23–29.

При выполнении полетов на Международную космическую станцию (МКС) космонавты подвергаются постоянному воздействию космической ионизирующей радиации. При этом доза радиационного воздействия зависит от многих факторов: высота орбиты МКС, фаза солнечной активности, условия защищенности космонавтов в различных обитаемых отсеках оборудованием и конструкцией станции, наличия на борту искусственных источников ионизирующих излучений. Особым периодом в пилотируемой экспедиции является внекорабельная деятельность (ВКД). Рассмотрению воздействия ионизирующей радиации на космонавтов при выполнении ВКД посвящено несколько работ [1–3]. Однако во всех работах рассмотрение ограничивалось получением оценок только поглощенной дозы. Согласно нормам радиационной безопасности [4], для контроля уровней радиационного воздействия на человека необходимо использовать величину эффективной дозы, которая для космонавтов блика к дозе радиационного воздействия на кроветворную систему [5], что важно для корректного расчета и прогнозирования состояния их здоровья и профессиональной работоспособности [6–8].

Процедура радиационного контроля при выполнении ВКД выглядит следующим образом. Накануне выполнения ВКД космонавты проводят обнуление 3 датчиков Пилле. Два датчика Пилле переносятся в модуль «Пирс» (СО-1) и помещаются в карман скафандра на левой ноге (где находятся и во время ВКД); 3-й – контрольный датчик – остается на пульте Пилле в рабочем отсеке большого диаметра (РОБД) служебного модуля (СМ) МКС. В день осуществления ВКД примерно за 2 ч 40 мин до открытия выходного люка (ОВЛ) космонавты переходят в модуль «Пирс» (СО-1), где надевают снаряжение, проверяют работоспособность радиоканалов, телеметрии с медицинской информацией, выполняют сатурацию кислородом. После закрытия выходного люка (ЗВЛ) космонавтам отводится 1 ч на шлюзование и выход из скафандров. После завершения ВКД датчики остаются в скафандрах, а на следующий день после ВКД проводится измерение поглощенных доз во всех 3 датчиках и определяется разность показаний между датчиками, использованными в скафандрах, и контрольным датчиком, находившимся в РОБД. Если бы до и после ВКД датчики Пилле из скафандров размещались рядом с контрольным датчиком, тогда разность показаний по поглощенной дозе точно соответствовала бы дополнительной дозе, полученной космонавтами за время ВКД. Нарушение такого режима измерений приводит к тому, что датчики Пилле в скафандрах, оставленных в модуле «Пирс» (СО-1), получают дополнительную дозу из-за того, что защищенность в модуле «Пирс» существенно ниже, чем в РОБД. Особенно разительная

Рис. 1. Космонавты во время выхода 6 июня 2007 г.

Рис. 2. Внутреннее пространство модуля «Пирс» перед стыковочным узлом с переходным отсеком служебного модуля МКС

картина получена для выхода (ВКД № 29), который проходил в негерметизированном переходном отсеке и продолжался 12 мин. При этом результаты контрольного датчика составили 436,2 мкГр, а датчиков, размещенных на скафандрах, – 605,8 и 831,6 мкГр. Следуя стандартной процедуре определения дополнительной поглощенной дозы, получим для одного космонавта дополнительную дозу в 169,6 мкГр (16,9 мрад) и 395,4 мкГр (39,5 мрад) – для другого. Полученные таким способом оценки дополнительной поглощенной дозы очевидным образом не соответствуют реальному положению дел.

Цель исследования состояла в расчетном моделировании радиационных нагрузок на отдельные системы и органы космонавтов при осуществлении ими ВКД.

Методика

Расчетное моделирование радиационного воздействия на космонавтов проводилось аналогично работам [2, 5]. Для каждой локализации космонавтов на внешней поверхности различных модулей российского сегмента (РС) МКС были выполнены расчеты функций экранированности всех представительных точек фантома [9]. Под функцией экранированности выбранной точки внутри рассматриваемого объекта понимается функция плотности вероятности встретить в любом направлении из рассматриваемой точки толщину защиты в интервале от X до $X + dX$. Были определены средние функции экранированности хрусталика глаза (ХГ – 2 точки фантома), кожи (КЖ – 2 точки фантома), кроветворной системы (КТС – 14 точек фантома с учетом процентного содержания красного костного мозга), желудочно-кишечного тракта (ЖКТ – 3 точки фантома), центральной нервной системы (ЦНС – 3 точки фантома) и гонад (ГН – 11 точек фантома) при размещении геометрической модели фантома в скафандре на различных участках внешних поверхностей РС МКС. Перемещение и работа космонавтов на поверхности модулей моделировались положением тела космонавта, параллельным оси модуля, а периоды отдыха – удалением космонавтов от поверхности на расстояние в 1 м. Строго говоря, во время работы космонавты иногда удаляются на расстояние больше 1 м (пример такого удаления представлен на рис. 1), но такие периоды непродолжительны.

В соответствии с циклограммами работ при ВКД определялись парциальные вклады в поглощенную и эквивалентную дозы от протонов и электронов радиационных поясов Земли и от галактических космических лучей с шагом по времени в 1 мин. Итоговые значения дополнительных доз ионизирующей радиации определялись суммированием парциальных вкладов. В циклограммах указываются виды работ и их продолжительность для каждого участника ВКД. Однако, как следует из результатов расчетов, только в редких случаях различия в циклограммах приводят к разным радиационным нагрузкам на космонавтов.

Для оценки поглощенной дозы за время, в течение которого скафандры находились в модуле «Пирс», были выполнены расчеты функции экранированности датчика Пилле, помещенного в пустой скафандр.

Согласно результатам работы [10], отношение среднесуточной мощности поглощенной дозы в модуле «Пирс» к среднесуточной мощности поглощенной дозы на панели № 327 в РОБД равно 1,25. Однако если рассматривать динамику этого показателя, то можно обнаружить периоды, когда величина этого показателя равна 2,26 (апрель – май

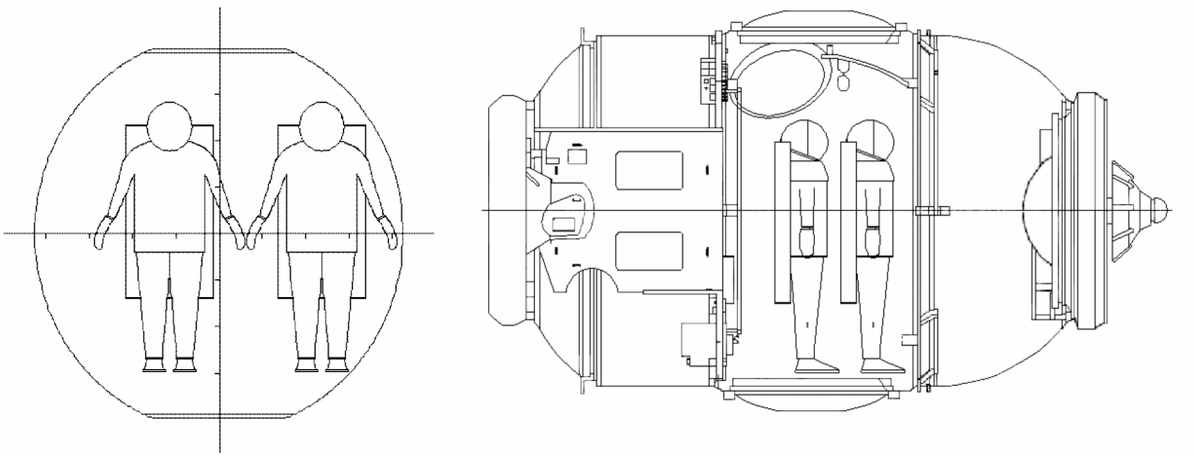


Рис. 3. Варианты размещения скафандров в модуле «Пирс» после завершения ВКД.
А – вид сверху; Б – вид сбоку

2009 г., апрель 2010 г.), 1,90 (июнь 2010 г.), 1,84 (февраль 2011 г.), 1,80 (январь – февраль 2013 г.) и т.д. К модулю «Пирс» регулярно пристыковываются грузовые корабли «Прогресс» либо транспортные корабли «Союз» с промежутками без дополнительного космического аппарата в 2–3 сут. Часто модуль «Пирс» используется космонавтами в качестве промежуточной перевалочной базы (пример размещения дополнительного имущества в модуле «Пирс» представлен на рис. 2). Когда модуль заполняется транзитными грузами и оборудованием, среднесуточная мощность поглощенной дозы уменьшается. В периоды подготовки и проведения ВКД внутреннее пространство модуля «Пирс» освобождается от ненужных предметов и среднесуточная мощность поглощенной дозы возрастает.

Перед ВКД выполняется прогноз дополнительных радиационных нагрузок на космонавтов по планируемой циклограмме работ. Поскольку плановая циклограмма не всегда выполняется, требуется повторное проведение расчетов по фактическим показателям начала и окончания ВКД. В отдельных случаях происходила задержка ОВЛ: ВКД № 20 – на 1 ч 17 мин из-за нарушений в системе охлаждения скафандра и в открытии люка, ВКД № 31 – на 1 ч 7 мин из-за проблем с герметичностью. В других случаях космонавты досрочно выполняли запланированные работы, и ЗВЛ происходило раньше запланированного времени.

Для сравнения результатов расчетного моделирования радиационной нагрузки на датчики Пилле с результатами измерений во время ВКД сначала необходимо провести сравнение расчетных и измеренных поглощенных доз в контрольном датчике. К сожалению, не всегда фиксировалось время измерения датчиков Пилле до и после ВКД. В отдельных случаях при передаче информации о показаниях датчиков Пилле космонавты сообщали номер витка, на котором проводились измерения. В таких случаях остается неопределенность ± 45 мин для более точного расчетного моделирования. Существенную помощь в данном сравнении оказывает то обстоятельство, что при снятии показаний с датчиков Пилле на пульте Пилле записывается время измерений. К сожалению, карта памяти пульта Пилле после возвращения на Землю передается разработчикам прибора Пилле в Венгрию, и проходит достаточно много времени, пока необходимая информация возвращается в Службу радиационной безопасности.

Результаты и обсуждение

Нам удалось получить из Венгрии часть результатов с записями времен измерений датчиков Пилле до и после ВКД. По имеющимся данным о временах измерений поглощенных доз в контрольном датчике были выполнены соответствующие расчеты поглощенных доз. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Необходимо отметить, что порядковые номера ВКД в табл. 1 не совпадают с нумерацией, используемой в Центре управления полетами

Из анализа результатов, представленных в табл. 1, следует, что только в 3 случаях (ВКД № 11, 31, 44) различие между результатами измерений и расчетов превышало 30 %, что для дозиметрических характеристик приемлемо. (Для датчиков Пилле паспортная точность определена в 20 %.)

Обращает на себя внимание часто большая разность (до 274 мкГр) между показаниями датчиков Пилле, размещенных в скафандрах. Для объяснения этой разности было выдвинуто предположение, что в модуле «Пирс» после завершения ВКД космонавты могут так оставлять скафандры, что один

Таблица 1

Сравнение расчетных и измеренных поглощенных доз в контрольном датчике Пилле

№ ВКД	Обмер Пилле до ВКД		Обмер Пилле после ВКД		Доза в контрольном датчике, мкГр		Погрешность, %
	Дата	Время	Дата	Время	Измерение	Расчет	
10	25.02.2004	17:22	27.02.2004	10:43	340,0	328,0	-3,5
11	23.06.2004	13:28	25.06.2004	17:26	429,0	294,3	-31,4
12	29.06.2004	15:25	01.07.2004	18:26	390,0	487,6	25,0
13	02.08.2004	9:34	04.08.2004	8:52	409,0	449,0	9,8
14	02.09.2004	17:37	04.09.2004	18:36	319,0	407,1	27,6
15	25.01.2005	7:47	27.01.2005	8:54	434,0	318,1	-26,7
16	27.03.2005	8:00	29.03.2005	11:13	350,0	283,5	-19,0
17	17.08.2005	20:35	19.08.2005	22:05	344,0	275,2	-20,0
18	03.02.2006	3:49	04.02.2006	23:59	381,0	289,5	-24,0
19	31.05.2006	23:48	02.06.2006	22:59	339,0	335,7	-1,0
20	22.11.2006	2:15	24.11.2006	1:28	308,0	285,3	-7,4
21	21.02.2007	13:16	23.02.2007	14:39	350,0	267,0	-23,7
22	29.05.2007	14:49	31.05.2007	17:16	359,0	342,8	-4,5
23	05.06.2007	11:58	07.06.2007	12:32	378,0	316,0	-16,4
24	09.07.2008	17:43	11.07.2008	18:11	424,0	367,9	-13,2
25	14.07.2008	16:43	16.07.2008	15:56	389,0	320,4	-17,6
27	09.03.2009	12:34	11.03.2009	14:23	576,0	422,7	-26,6
31	25.07.2010	14:26	28.07.2010	14:48	557,0	350,3	-37,1
36	15.02.2012	12:39	17.02.2012	15:34	533,2	453,8	-14,9
43	25.12.2013	12:40	28.12.2013	12:36	777,0	751,8	-3,2
44	26.01.2014	9:37	28.01.2014	16:38	860,5	564,3	-34,4
45	18.06.2014	10:09	20.06.2014	18:22	637,2	620,4	-2,6
46	17.08.2014	17:32	19.08.2014	18:32	568,5	568,9	0,1
47	21.10.2014	11:04	23.10.2014	13:19	613,2	526,7	-14,1
48	09.08.2015	13:45	11.08.2015	21:39	576,5	607,6	5,4

Таблица 2

Средние значения (M) и дисперсии (S) отклонений результатов расчетов от экспериментальных данных (%)

Размещение датчиков Пилле в скафандрах после их обнуления

Размещение	1-й вариант		2-й вариант		3-й вариант		4-й вариант
	1-й скаф.	2-й скаф.	1-й скаф.	2-й скаф.	1-й скаф.	2-й скаф.	1 скаф.
M	99,9	31,4	126,0	92,7	85,8	59,8	59,9
S	43,9	37,9	49,7	45,1	39,3	36,1	33,5

Размещение датчиков Пилле в скафандрах перед ВКД

Размещение	1-й вариант		2-й вариант		3-й вариант		4-й вариант
	1-й скаф.	2-й скаф.	1-й скаф.	2-й скаф.	1-й скаф.	2-й скаф.	1 скаф.
M	19,8	-1,7	27,8	20,5	14,1	9,4	6,1
S	22,8	18,2	24,3	21,8	21,4	19,8	18,9

Таблица 3

Расчетные значения эквивалентных доз для основных органов и систем организма космонавтов (мкЗв)

№ ВКД	КЖ	ХГ	КТС	№ ВКД	КЖ	ХГ	КТС
1	33,6	33,9	24,2	25	412,5	405,8	216,9
2	151,2	11,1	69,5	26	292,6	297,5	170,1
3	317,7	323,4	161,9	27	338,4	353,3	215,6
4	421,5	399,5	202,9	28	309,4	341,2	206,7
5	287,4	295,1	166,8	29	65,8	69,1	43,2
6	143,3	123,4	97,8	30	214,8	236,2	127,9
7	321,1	332,5	183,8		230,5	249,8	129,9
8	405,6	406,4	213,4	31	551,7	539,1	290,1
9	446,7	434,0	246,8	32	131,2	115,7	79,6
10	226,9	195,3	144,2	33	168,2	150,9	97,1
11	50,5	44,5	42,0	34	195,3	173,8	111,0
12	230,6	242,9	150,0	35	401,9	383,8	204,0
13	283,5	286,5	163,3	36	505,1	488,7	252,5
14	436,6	413,5	260,7	37	153,3	134,8	97,9
15	469,4	480,0	266,3	38	283,9	289,6	171,8
16	256,1	269,0	151,8	39	193,3	185,3	123,2
17	412,3	389,8	216,7	40	386,4	391,2	228,8
18	384,1	368,8	225,7	41	311,8	325,5	174,2
19	207,4	206,9	135,1	42	479,3	444,7	205,5
	187,6	179,9	124,5	43	275,1	236,7	154,1
20	273,8	261,2	149,0	44	503,6	474,6	258,8
21	211,6	218,9	140,8	45	256,2	246,6	148,1
22	263,4	260,5	154,8	46	148,3	130,6	91,5
	202,8	206,6	135,0	47	133,4	119,1	87,5
23	230,9	224,3	153,7	48	262,7	272,6	144,4
24	320,9	340,6	186,0				

из них будет дополнительно экранировать другой. Мы рассмотрели 4 варианта размещения скафандров в модуле «Пирс»:

– скафандры расположены перпендикулярно оси модуля, один из них ближе к оболочке, как показано на рис. 3 слева (1-й вариант);

– скафандры расположены по оси модуля, как показано на рис. 3 справа (2-й вариант);

– скафандры расположены по варианту 2, но между люками модуля расположен различный инвентарь, как показано на рис. 2 (3-й вариант);

– 4-й вариант основан на средней по 4 ориентациям одного скафандра функции экранированности (скафандр ориентирован вверх, вниз, влево, вправо).

Для всех 4 вариантов расположения скафандров рассмотрены 2 варианта размещения датчиков Пилле: датчики Пилле размещаются в скафандрах сразу после обнуления и датчики Пилле размещаются в скафандрах непосредственно перед ВКД. В обоих случаях после ВКД датчики остаются в скафандрах в модуле «Пирс».

Инструкциями по подготовке и проведению ВКД предусмотрено, что датчики Пилле размещаются в скафандрах сразу после обнуления. Однако в результате расчетов выяснено, что всего лишь в 3 случаях (ВКД № 26, 31 и 44) при размещении датчиков Пилле в скафандрах непосредственно после обнуления разница между результатами расчетов и измерений оказалась меньше 30 % для 3-го варианта размещения скафандров.

Не приводя результаты расчетов всех вариантов размещения скафандров с разными условиями размещения датчиков Пилле, ограничимся средними характеристиками измерений, представленными в табл. 2.

Из анализа результатов табл. 2 следует, что при переходе от варианта размещения скафандров № 2 к варианту № 3 различие между результатами расчетов и измерений существенно уменьшалось. Разность между значениями поглощенных доз в датчиках Пилле для 3-го варианта достигала 312 мкГр. При этом неизвестно какое имущество космонавтов находилось в модуле «Пирс» и как оно было расставлено. Вполне возможно, что оно занимало место не только между люками, но и в торцевых областях модуля, что могло привести к дальнейшему уменьшению разности между расчетами и измерениями. Неизвестно было и расположение скафандров после каждого сеанса ВКД в модуле «Пирс». В любом случае ясно, что определение дозовой нагрузки на космонавтов путем вычитания из показаний датчиков Пилле, использованных при ВКД, показаний контрольного датчика приводит к ошибочной оценке поглощенной дозы космонавтами. Разность в показаниях датчиков Пилле обусловлена не различием в циклограммах работы космонавтов, а различными условиями экранировки этих датчиков за время их нахождения в скафандрах в модуле «Пирс».

Достаточно удовлетворительное согласие между расчетными и измеренными величинами поглощенных доз в контрольном датчике позволяет представить результаты расчетов эквивалентных дополнительных доз, полученных космонавтами за ВКД. Поскольку, согласно нормам радиационной безопасности при космических полетах, контролируются дозы на ХГ, КЖ и КТС, ограничимся представлением только таких данных. Напомним, что эффективные эквивалентные дозы близки к дозам на КТС. Соответствующие результаты представлены в табл. 3.

При анализе результатов табл. 3 необходимо иметь в виду, что для ВКД № 19 и 30 2 строки результатов обусловлены различиями в циклограммах работы космонавтов. При этом различия

в эффективных дозах (дозы на КТС) существенно меньше, чем различия в дозах на КЖ или ХГ.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие практические рекомендации:

1. После выполнения ВКД необходимо проводить новый расчет радиационных нагрузок на космонавтов по фактическому исполнению циклограммы работ.
2. Для получения корректной расчетной оценки поглощенных и эквивалентных доз за время выполнения ВКД необходимо обязательно фиксировать время измерений датчиков Пилле до и после ВКД.
3. Оценку дополнительной дозовой нагрузки на космонавтов рекомендуется выполнять следующим путем:

– вычислить нормировочный коэффициент в виде отношения значения измеренной контрольным датчиком поглощенной дозы к значению такой же дозы, полученной расчетным путем;

– расчетные значения поглощенных и эквивалентных доз, полученные космонавтами за время подготовки и выполнения ВКД, умножить на значение нормировочного коэффициента; полученные результаты будут соответствовать дополнительной дозе радиационного облучения, полученной космонавтами.

4. Необходима разработка активного дозиметра, который позволил бы или передавать по радиосвязи значение дозы перед ОВЛ и после ОВЛ, или записывать текущие значения поглощенной дозы в память дозиметра.

Выводы

1. В настоящее время расчетное моделирование создает единственную возможность корректной оценки радиационного воздействия как на космонавтов в целом, так и на их отдельные органы и системы.
2. Оставление датчиков Пилле в скафандрах до и после завершения ВКД в модуле «Пирс» приводит к дополнительной радиационной нагрузке на датчики Пилле, которая зависит от взаимного расположения скафандров; этот эффект необходимо учитывать при определении дополнительной дозы.
3. При выполнении ВКД дополнительные эффективные дозы космонавтов лежат в диапазоне 24,2–290,1 мкЗв.

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН и при финансовой поддержке РКК «Энергия» по договору № 14-15-730 от 19.03.2014 г.

Список литературы

1. *Митрикас В.Г.* Оценки радиационных нагрузок на космонавтов при осуществлении внекорабельной деятельности на Международной космической станции // Авиакосм. и экол. мед. 2007. Т. 41. № 4. С. 49–53.

Mitrikas V.G. Estimates of radiation loads on the astronauts in the implementation of extravehicular activity on the International Space Station // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2007. V. 41. № 4. P. 49–53.

2. *Митрикас В.Г.* Радиационное воздействие на космонавтов при осуществлении внекорабельной деятельности в 2008–2009 годах // Там же. 2010. Т. 44. № 3. С. 3–9.

Mitrikas V.G. Radiation effects on astronauts during extravehicular activity implementation in 2008–2009 // Ibid. 2010. V. 44. № 3. P. 3–9.

3. *Карташов Д.А.* Радиационные нагрузки на космонавтов при внекорабельной деятельности в скафандре «Орлан-М» на низких околоземных орбитах: Дис. … канд. техн. наук. Москва, 2009.

Kartashov D.A. Radiation load on the astronauts during extravehicular activities in space suit «Orlan-M» in low-Earth orbits: Dissertatsiya … kandidata tekhnicheskikh nauk. Moscow, 2009.

4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утв. Гл. санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко 07.07.2009.

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

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

Mitrikas V.G. Estimation of ionizing radiation effective dose in the International Space Station by the method of calculation modeling // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2015. V. 49. № 3. P. 5–11.

6. Клинико-функциональная диагностика, профилактика и реабилитация профессионально обусловленных нарушений и субклинических форм заболеваний у летного состава: Практ. руководство по авиационной клинической медицине / Р.А. Вартбаронов, ред. М., 2011.

Clinical and functional diagnosis, prevention and rehabilitation of professionally caused disorders and subclinical disease in flight personnel: Practical Guide to Aviation clinical medicine / Vartbaronov R.A., ed. Moscow, 2011.

7. *Ivanov I.V., Darenskaya N.G., Ushakov I.B.* Первоначальная индивидуальная реакция организма и ее особенности на радиацию в малых дозах // Матер. Междун. конф. «Биологические основы индивидуальной чувствительности к психотропным средствам». М., 2006. С. 109.

Ivanov I.V., Darenskaya N.G., Ushakov I.B. The initial individual reactivity and peculiarities of the organism reaction to irradiation in small doses // Abstracts 4th International Conference «Biological basis of individual sensitivity to psychotropic drugs». Moscow, 2006. P. 109.

8. *Иванов И.В.* Оценка состояния здоровья лиц, подвергавшихся воздействию ионизирующего излучения в малых дозах // Восьмой Междун. аэрокосм. кон.: Тез. докладов. М., 2015. С. 226–227.

Ivanov I.V. Assessment of the health of persons exposed to ionizing radiation in low doses // Eighth International Aerospace Congress: Abstracts. Moscow, 2015. P. 226–227.

9. ГОСТ 25645.204. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета экранированности точек внутри фантома. М., 1984.

GOST 25645.204. Radiation safety of a spacecraft crew in space flight: Methods of screening points calculating within the phantom. Moscow, 1984.

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

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

Поступила 22.10.2015

EFFECTIVE DOSES FROM IONIZING RADIATION EXPOSURE OF COSMONAUTS DURING EXTRAVEHICULAR ACTIVITY

Mitrikas V.G., Khorosheva E.G.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 23–29

To ensure radiation safety of cosmonauts it is necessary to know values of effective equivalent dose to cosmonauts not only over the period of life inside the International space station (ISS) but also during extravehicular activity (EVA). At present, calculation is the only method of correct estimate of radiation exposure of total body, and specific organs and systems. The paper discusses some aspects of mathematical modeling of radiation exposure during EVA on the ISS Russian segment. Comparison of dosimeter Pille calculation and experimental data evidences that determination of exposure by subtraction of control dosimeter readings from the EVA-used Pille readings results in a faulty absorbed dose estimate. The authors give some practical advice on how to determine values of additional radiation exposure during EVA and equivalent doses received by cosmonauts who had participated in the earliest 48 egresses to open space.

Key words: International space station, extravehicular activity, ionizing radiation, irradiation of cosmo-nauts, absorbed dose, shielding function.

УДК 613.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕБИОТИКА ЭУБИКОРА ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ДИСБАКТЕРИОЗОВ В ОТДАЛЕННОМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ПЕРИОДЕ ОРГАНИЗМА ПОСЛЕ γ-ОБЛУЧЕНИЯ

Смирнов С.К., Ильин В.К., Усанова Н.А., Гордеев Ю.В., Орлов О.И.

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

E-mail: ilyin@imbp.ru

Исследовалась эффективность пребиотика Эубикора для коррекции изменений микробиоценоза кишечника, в том числе вызванных воздействием ионизирующего облучения на приматов. На фоне приема Эубикора отмечается снижение колебаний микрофлоры кишечника, снижается время элиминации патогенной флоры, отмечается активация облигатной флоры. Можно предположить, что максимальная доза Эубикора приводит к наиболее быстрой коррекции микробиоценоза с улучшением состояний через 1 мес после приема.

Ключевые слова: микрофлора, приматы, пребиотики, дозы γ-облучения.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 30–34.

Исследования состояния микробиоценоза организма после радиационных воздействий в относительно высоких дозах представляют большой интерес, так как измененные физические составляющие среды обитания могут привести к существенным дисбиотическим сдвигам, ослаблению защитных сил организма и повышению восприимчивости к возбудителям инфекции, в том числе и к представителям собственной микрофлоры.

Любое воздействие, ухудшающее жизнедеятельность организма, нарушает бактериальное равновесие нормальной микрофлоры. Это обстоятельство определяет необходимость проведения коррекции микробиоценоза с помощью пребиотических средств [1, 2].

Целью работы является исследование эффективности использования пребиотика Эубикора в качестве средства профилактики дисбактериозов у приматов, в том числе подверженных воздействию радиации.

Исследовалась эффективность пребиотика Эубикора для коррекции изменений микробиоценоза кишечника, в том числе вызванных экстремальными условиями. Пребиотические средства более комплементарны организму, чем пробиотики, поскольку они содействуют росту аутохтонной микрофлоры, а не привносят в организм чужеродные микроорганизмы, которые в значительном количестве случаев не приживляются и не приносят долговременного эффекта [3].

Методика

В эксперименте по приему препарата Эубикора были использованы животные вивария ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Часть животных до приема препарата получала лучевую нагрузку. Все животные были разделены на группы по 4 особи с различными курсами приема препарата.

Исследование микрофлоры фекалий проводилось перед курсом приема препарата, на 14, 21, 28-е сутки приема и 1 мес спустя после приема препарата.

Характеристика групп обследуемых обезьян представлена в табл. 1.

Обезьяны 5-й группы повергались ранее непрерывному облучению в течение 12 сут с мощностью дозы 25 сГр/сут в суммарной дозе 250 сГр (учитывая быстрые восстановительные процессы в системе кроветворения на клеточном и тканевом уровнях, эффективная остаточная доза на момент окончания облучения составила 100 сГр). Затем спустя 100 сут эти же обезьяны подверглись дополнительно кратковременному острому тестирующему воздействию в дозе 132 сГр, моделирующему воздействие на космонавтов солнечных космических лучей при развитии мощных солнечных протонных событий. Суммарная доза для обезьян 5-й группы составила 382 сГр. Обезьяны 6-й группы подвергались в 1-й серии 2 равным острым облучениям через 1 нед в суммарной дозе 132 сГр (эффективная остаточная доза согласно расчетам составила также 100 сГр), а затем через 100 сут острому тестирующему воздействию в те же сроки и в той же дозе 132 сГр. Суммарная поглощенная доза в этой группе была несколько меньшей 264 сГр [4].

Введение препарата Эубикора начали осуществлять через 280 сут после начала облучения обезьян.

Таблица 1

Характеристика групп обследуемых обезьян

Группы обезьян					
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Получали по 3 пакета Эубикора	Получали по 2 пакета Эубикора	Получали по 1 пакету Эубикора	Не получали Эубикор	Были облучены, прием по 3 пакета Эубикора	Были облучены, не получали Эубикор

Таблица 2

Содержание микрофлоры в различных группах обезьян

Время, сут	Группы обезьян					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Лактобациллы						
0-е	7,5	7,5	7,5	7,5	6,7	7
14-е	6,5	6,9	7,5	7	6,5	6,9
21-е	6,5	7,5	7,5	7	6,3	6,8
28-е	6,8	7,5	7	7,3	6,3	6,4
58-е	7	7	6,8	7,5	6,3	6,7
Кишечная палочка						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	4	5,1	5	5,5	6,3	4,8
14-е	4	5,5	7	5,5	5,7	5,3
21-е	4,1	5,3	4,5	4,8	5,7	5,3
28-е	6,3	5,5	4,5	5	6	5,3
58-е	6,3	5,5	5	5,5	5,7	5,3
Кишечная палочка с измененными биохимическими свойствами						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	2,1	0	0	2,8	2	2,5
14-е	1,8	0	3	3	3,7	2,7
21-е	1,5	3,3	1,8	3,6	6	1,7
28-е	0	4,3	1,8	3	5,7	1,7
58-е	1,3	3	1,8	2,5	5,7	0
Гемолитический стафилококк						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	5,8	4	2,8	3,3	1	0,7
14-е	1	3,5	2	2,3	0	0,7
21-е	0,7	3	1,4	1,3	0	1
28-е	2	3	0,7	1,3	0	1
58-е	3	2,8	1,5	2,3	1,3	1
Клебсиелла						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	3	1,8	0	1,8	0	1,5
14-е	0	0	0	1,3	0	1,3
21-е	0	0	1,3	5,3	2	2,8
28-е	0	0	0	5,3	2	2,8
58-е	0	0	0	2,3	0	1,3

Продолжение табл. 2

Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Золотистый стафилококк						
0-е	3,3	3,8	3,3	5,3	3,3	3
14-е	4	4	3	4,5	5	5
21-е	3,5	1,8	3,8	3,8	4,7	3,5
28-е	2,8	1,8	3,8	3,8	4,7	3,5
58-е	2	1,8	3,5	1,5	2,7	2,8
Дрожжи						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	4	4,3	4,8	5,5	4	4
14-е	3	2,8	2	3	3,3	4
21-е	1,5	2,5	2	4	4	2,8
28-е	1,5	3,5	2	4	4	4
58-е	3,3	2,8	2,8	4	3,7	3,8
Зеленящий стрептококк						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	3,5	3,8	3	6,5	6,7	6,3
14-е	3	5,5	5,1	7,3	7,7	7,8
21-е	2,5	6	4,5	6,8	6	4
28-е	0	1,3	2,8	4	6	2,8
58-е	0	1,3	2,8	2,5	6,3	2,8
Микрофлора кишечника (индекс дисбиоза)						
Время, сут	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
0-е	4,3	3,8	3,3	4	3,8	3,5
14-е	1,8	2	1,8	3	3	4,3
21-е	1,8	3	3	3,8	3,5	4,3
28-е	0,5	2,5	2	4,5	4	2,5
58-е	0,3	2,3	1,8	2,5	2,3	1,3

Результаты и обсуждение

Результаты исследований представлены в табл. 2 и на рис. 1–3.

Лактобациллы. При введении пребиотика Эубикора отмечали тенденцию к снижению концентраций лактобацилл относительно нормы, более выраженное при меньшей его концентрации. В качестве исходной нормы принимали среднее значение, установленное по исходным показателям во всех 6 группах. Среднее значение КОЕ Lg/g для лактобацилл составило 7,3 ± 0,15 (доверительный 95 %-ный интервал от 7,0 до 7,6). Предварительное облучение в меньшей дозе (группа № 6) без введения пребиотика привело к такому же снижению концентрации лактобацилл. Более выраженное снижение отмечено в группе № 5 после облучения и введении максимальной концентрации пребиотика. Содержание нормальной кишечной палочки КОЕ Lg/g изменялось незначительно во всех группах и находилось в пределах нормы 5,1 ± 0,5 (доверительный 95 %-ный интервал от 4,1 до 6,1).

Кишечные палочки с измененными биохимическими свойствами. Концентрация кишечной палочки с измененными биохимическими свойствами также изменялась незначительно и находилась в пределах нормы 2,1 ± 1,0. Разброс несколько увеличился, и доверительный 95 %-ный интервал оказался более широким – от 0 до 4,1). Ближе к контрольной 4-й группе находилась концентрации кишечной палочки во 2-й группе при использовании 2 пакетиков пребиотика. В то же время при меньших концентрациях пребиотика в 1-й группе и больших в 3-й группе наблюдается тенденция к снижению концентрации кишечной палочки. В 5-й группе после облучения и применения максимальной концентрации пребиотика имело место значительное увеличение концентрации кишечной палочки с измененными биохимическими свойствами.

Золотистый стафилококк. Исходное содержание золотистого стафилококка в группах отличалось

большой лабильностью. Среднее исходное значение КОЕ lg/g этого стафилококка составляло 3,3 ± 1,0. Имел место значительный разброс значений концентраций (доверительный 95 %-ный интервал находился в диапазоне 1,3–5,3). После 14 сут во всех группах отмечалась тенденция к снижению его содержания, наиболее выраженная во 2-й группе. Близкие к средней норме находились концентрации в 4-й и 6-й группах без введения пребиотика). Лишь в 5-й группе с проведенным ранее облучением в большей дозе и применении максимальной концентрации вводимого пребиотика отмечали выраженное увеличение содержания золотистого стафилококка, которое превышало значения во всех других группах. Однако его концентрация приблизилась к норме через месяц после окончания приема препарата.

Гемолитический стафилококк. Содержание гемолитического стафилококка в исходном состоянии также было подвержено большой лабильности, наблюдались значительные различия между группами животных. Среднее значение КОЕ lg/g составляло 4,0 ± 0,8 (95 %-ный доверительный интервал от 2,4 до 5,6). Во всех группах относительно исходного уровня отмечалось значительное падение его концентрации как в группах № 4 и 6, в которых не было приема пребиотика, так и в группах № 1 и 3. Несколько меньшую глубину падения наблюдали в группе № 2. Значительное опустошение имело место в группе № 5 с предварительным в прошлом облучением и максимальной дозой пребиотика. Максимальное снижение концентрации имело место еще до приема препарата и было обусловлено, возможно, только облучением. Такие изменения наблюдались в группах № 5 и 6.

Условно-патогенные дрожжи. Среднее исходное значение КОЕ lg/g дрожжей для всех групп составило 4,5 ± 0,3 (95 %-ный доверительный интервал от 3,9 до 5,1). Наименьшие изменения по сравнению с контрольной группой № 4 и исходной нормой наблюдали в группах № 5 и 6, обезьян в которых подвергли ранее γ-облучению и в группе № 2. Более выраженное снижение концентрации имело место в группах № 1 и 3 (см. рис. 1)

Зеленящий стрептококк. Среднее исходное значение содержания зеленящего стрептококка по всем группам составляло 5,0 ± 0,8 (95 %-ный доверительный интервал от 3,4 до 6,6). Оно сильно менялось и в контрольной группе № 4. В этой группе, как и в группах № 5 и 6 с предварительным в прошлом облучении, к 14-м суткам наблюдали незначительное повышение концентрации, которая в последующие периоды заметно снижалась. Лишь в 5-й группе с максимальной дозой предварительного облучения концентрация зеленящего стрептококка сохранялась на значительно высоком уровне (выше средней исходной) и существенно превышала концентрации в остальных группах. На 14–21-е сутки наблюдалось

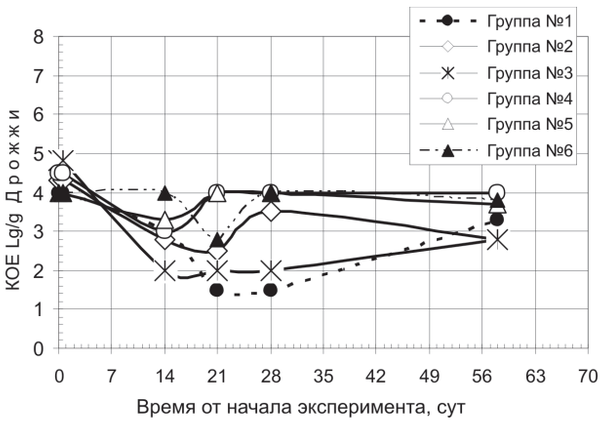


Рис. 1. Содержание патогенных дрожжей в составе микрофлоры кишечника обезьян в экспериментальных группах

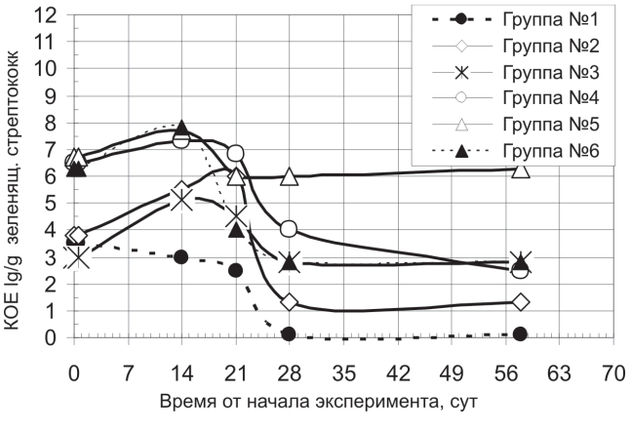


Рис. 2. Содержание зеленящего стрептококка в составе микрофлоры кишечника обезьян в экспериментальных группах

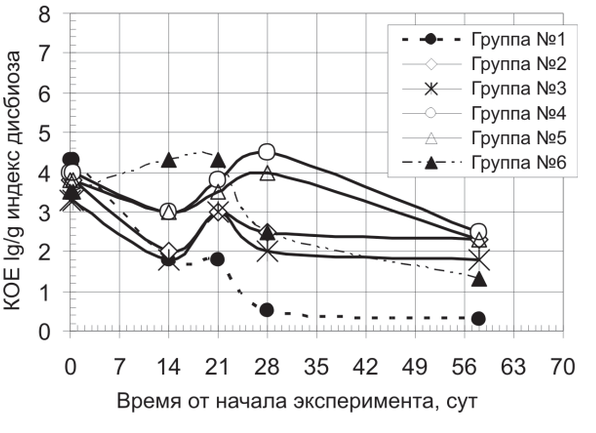


Рис. 3. Изменение микрофлоры кишечника обезьян (индекс дисбиоза)

также повышение концентраций зеленящего стрептококка в группах № 2 и 3, которые сначала находились вблизи исходной нормы, а к 28-м суткам значительно снижались, оставаясь на этом уровне и через

месяц после приема пребиотика. Менее выраженное снижение имело место в 3-й группе, а наибольшее падение было в группе № 1 (см. рис. 2).

Клебсиеллы. Среднее исходное содержание клебсиелл составиляло 1,8 ± 0,6 (95 %-ный доверительный интервал от 0,6 до 3,0). Максимальные изменения наблюдали в контрольной 4-й группе. Концентрация на 21–28-е сутки резко увеличилась почти в 3 раза, а к 58-м суткам вернулась к исходному уровню. Содержание этой бактерии в 5-й и 6-й группах с предварительным облучением все время находилось около исходного уровня. Введение пребиотика во всех дозах приводило к резкому снижению концентраций этой бактерии почти до нулевого уровня.

Индекс дисбиоза. На основе исходных данных видно, что показатель индекса дисбиоза был наименее подвержен флуктуации. Можно отметить, что максимальное снижение этого индекса имело место в группе № 1. Несколько меньшее его снижение по сравнению с исходным уровнем и данными контрольной группы № 4 наблюдали в группах № 2 и 3 с большими уровнями приема пребиотика. Максимально высокий уровень был в контрольной 4-й группе. Во всех группах к 58-м суткам наблюдали снижение индекса дисбиоза по сравнению с исходным уровнем (см. рис. 3).

Выводы

1. На фоне приема Эубикора отмечалось снижение колебаний микрофлоры кишечника, снижение времени элиминации патогенной флоры, активации облигатной флоры. Максимальная доза Эубикора приводила к наиболее быстрой коррекции микробиоценоза с улучшением состояний через 1 мес после приема.
2. Активность пребиотика Эубикора была наиболее выражена в тех группах животных, которые не подвергались облучению. При коррекции микрофлоры у животных, подвергавшихся облучению, необходимо использовать Эубикор в составе комплексной профилактики.
3. Пребиотик Эубикор может быть использован в качестве средства коррекции микробиоценоза кишечника и рекомендован для профилактики дисбактериозов в экспериментах с участием человека.

Авторы выражают благодарность сотруднику ГНЦ РФ – ИМБП РАН А.В. Шафиркину за неоценимую помощь при подготовке данной статьи.

Список литературы

1. *Ильин В.К., Воложин А.И., Виха Г.В.* Колонизационная резистентность организма в измененной среде обитания. М., 2005.

Ilyin V.K., Volozhin A.I., Vikha G.V. Colonization resistance of the organism in modified environment. Moscow, 2005.

2. *Ильин В.К., Суворов А.Н., Кирюхина Н.В. и др.* Аутопробиотики как средство профилактики инфекционно-воспалительных заболеваний у человека в искусственной среде обитания // Вестн. РАМН. 2013. № 2. С. 56–62.

Ilyin V.K., Suvorov A.N., Kiryukhina N.V. et al. Autoprobiotics as a means of prevention of infectious and inflammatory diseases in humans in an artificial environment // Vestnik RAMN. 2013. № 2. P. 56–62.

3. *Гриневич В.Б., Сас Е.И., Лубашев Я.А., Дячук А.В.* Применение Эубикора в составе комплексной терапии больных неалкогольным стеатогепатитом для коррекции нарушений липидного и углеводного видов обмена // Мед. альманах. 2008. № 1.

Grinevich V.B., Sas E.I., Lubashev Ya.A., Dyachuk A.V. Eubicor application in the complex therapy of patients with non-alcoholic steatohepatitis for the correction of lipid and carbohydrate metabolism types // Meditsinskiy almanakh. 2008. № 1.

4. *Бурковская Т.Е., Шафиркин А.В., Петров В.М. и др.* Формирование радиационного поражения и характер восстановительных процессов в системе кроветворения у обезьян при непрерывном и фракционированном гамма-облучении в равноэффективных дозах // Авиакосм. и экол. мед. 2012. Т. 46. № 5. С. 33–41.

Burkovskaya T.E., Shafirkin A.V., Petrov V.M. et al. Formation of radiation damage and the nature of the recovery processes in the hematopoietic system in monkeys with continuous and fractionated gamma irradiation at equally effective doses // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2012. T. 46. № 5. P. 33–41.

Поступила 01.06.2015.

EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF PREBIOTIC EUBICOR FOR PREVENTION OF DYSBACTERIOSIS IN A DELAYED PERIOD OF BODY REHABILITATION AFTER γ-IRRADIATION

Smirnov S.K., Ilyin V.K., Usanova N.A., Gordeev Yu.V., Orlov O.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 30–34

The subject of investigation was effectiveness of prebiotic Eubicor in correction of changes in intestinal microbiocenosis including those caused by ionizing radiation exposure of primates. Eubicor was found to lower amplitude of variations in intestinal microflora, to shorten time of pathogens elimination, and to activate obligate flora. We can make a supposition that a maximal Eubicor dose may correct microbiocenosis particularly swiftly with an apparent improvement coming already after one month of treatment.

Key words: microflora, primates, prebiotics, γ-radiation dose.

УДК 58.057

ХРОМОСОМНЫЕ НАРУШЕНИЯ В СЕМЕНАХ САЛАТА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ АРГОНА И ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ

Платова Н.Г.[1], Лебедев В.М.[2], Спасский А.В.[2], Толочек Р.В.[1], Труханов К.А.[1]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: nataliaspl@inbox.ru

Приведены результаты раздельного и комбинированного воздействия ядер аргона с энергией 290 МэВ/нуклон (линейная передача энергии около 1,1·10² кэВ/мкм) и ослабления геомагнитного поля (т.е. сочетания условий, характерных для Луны и дальнего космоса) на семена салата Lactuca sativa. Поглощенная доза составляла 1 Гр, геомагнитное поле по сравнению с его величиной в Московском регионе (порядка 5·10² мкТл) было ослаблено в 2,5·10³, в 3,6·10² и в 5·10¹ раз соответственно. При анализе ана-телофаз в 1-м митозе меристемы корня максимальный процент аберрантных клеток был у облученных семян, проросших при ослаблении геомагнитного поля в 2,5·10³ раз, что свидетельствует о синергизме воздействия.

Ключевые слова: дальние космические полеты, тяжелые ионы, гипомагнитные условия, комбинированное биологическое действие, *Lactuca sativa*, семена салата, хромосомные аберрации.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 35–41.

На лунной и марсианской базах, в окололунном и межпланетном пространстве человек и элементы биорегенеративных систем жизнеобеспечения (БСЖО) окажутся в магнитном поле, пониженном на 3–5 порядков по сравнению с привычными условиями на Земле и при околоземных полетах. Возрастет радиационная нагрузка от потоков галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ соответственно), которые в околоземном пространстве в значительной степени отклоняются геомагнитным полем (ГМП). В ГКЛ и СКЛ, как известно, присутствуют тяжелые ионы, обладающие повышенным радиобиологическим действием ввиду высоких величин линейной передачи энергии (ЛПЭ).

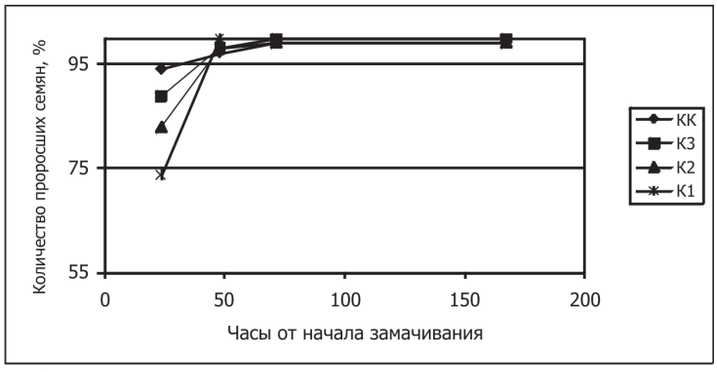
Имеющиеся данные указывают на то, что оба эти фактора могут отрицательно влиять как на человека, так и на элементы БСЖО. Особенно нежелательное воздействие в большинстве случаев они оказывают на начальных стадиях развития биологических объектов [1–4].

До сих пор практически нет экспериментальных исследований по комбинированному воздействию обоих этих факторов на биологические объекты. В недавней работе [5] отмечается синергизм их воздействия на прокариотический одноклеточный организм: цианобактерию *Synechocystis sp*. PCC 6803, облученный α-частицами с энергией 28 МэВ (ЛПЭ около 2,5·101 кэВ/мкм) из циклотрона МГУ в гипомагнитных условиях.

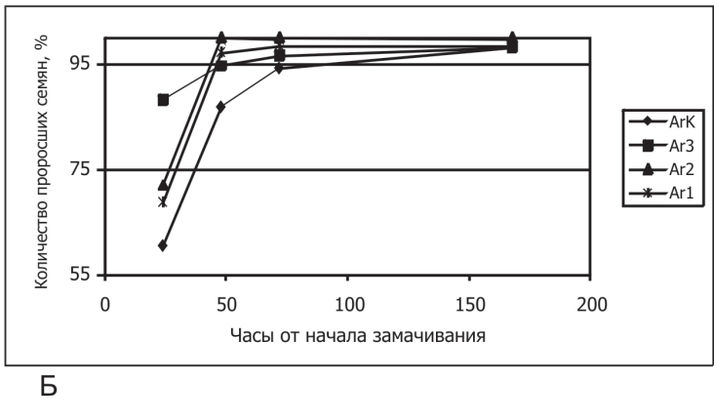
В данной работе в качестве биологического объекта выбраны семена салата. Растения являются необходимым компонентом БСЖО [6], и, кроме того, наличие оранжереи с растениями оказывает позитивный психологический эффект, а степень вовлеченности членов экипажа в работу по уходу за растениями определяет величину и направленность экопсихологического эффекта [7]. Для оценки биологических эффектов, помимо первичных ростовых процессов, использовали уровень цитогенетических повреждений в апикальной меристеме корня. Хромосомные аберрации свидетельствуют о повреждении генетического аппарата клетки [8, 9] и используются при анализе степени радиационного и химического мутагенного воздействия на живые организмы. Предельно допустимые дозы за карьеру космонавтов не превышают 1 Зв [10]. Такого порядка дозы могут рассматриваться в экспериментальных исследованиях. В экспериментах по облучению семян салата ионами гелия с энергией 150 МэВ/нуклон, углерода с энергией 400 МэВ/нуклон, железа с энергией 500 МэВ/нуклон и кремния с энергией 490 МэВ/нуклон в дозе 100 мГр было получено достоверное увеличение по сравнению с контролем частоты хромосомных аберраций и клеток с множественными аберрациями [11]. В данном эксперименте была выбрана доза 1 Гр. Такая доза не снижает выживаемость семян, но вызывает значимые хромосомные нарушения [12].

Методика

Для эксперимента использовали семена салата *Lactuca sativa* урожая 2012 г. сорта Московский парниковый, полученные в условиях защищенного



А



Б

Рис. 1. Прорастание семян салата.
Здесь и на рис. 2–4: КК – без облучения, прорастание при $3 \cdot 10^1$ – $4 \cdot 10^1$ мкТл; К3 – без облучения, прорастание при $1 \cdot 10^3$ нТл; К2 – без облучения, прорастание при $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл; К1 – без облучения, прорастание при $2 \cdot 10^1$ нТл; ArK – облучение ионами ^{40}Ar, прорастание при $3 \cdot 10^1$ – $4 \cdot 10^1$ мкТл; Ar3 – облучение ионами ^{40}Ar, прорастание при $1 \cdot 10^3$ нТл; Ar2 – облучение ионами ^{40}Ar, прорастание при $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл; Ar1 – облучение ионами ^{40}Ar, прорастание при $2 \cdot 10^1$ нТл

грунта Московской обл. на опытно-производственной базе ФГБНУ ВНИИССОК.

Семена облучали на медицинском ускорителе тяжелых ионов HIMAC Национального института радиологических наук (NIRS, г. Чиба, Япония) ионами ^{40}Ar с энергией 290 МэВ/нуклон и ЛПЭ (в воде), равной $1{,}1 \cdot 10^2$ кэВ/мкм. Мощность дозы составила 3,3 мГр/с. Описание ускорителя дано в работе [13]. Семена для облучения на ускорителе HIMAC и обратно доставлялись в салоне самолета, высота около 10 км, время полета 10 ч. Поглощенная доза составила 1 Гр, флюенс частиц – $5{,}6 \cdot 10^6$ 1/см^2 (далее варианты с маркировкой Ar). Сборка для облучения состояла из термолюминесцентных и твердотельных трековых детекторов, пакетиков из кальки 2 х 2 см с семенами россыпью. Сборка помещалась перпендикулярно пучку, доза контролировалась тонким сцинтилляционным детектором. Пучок ионов проходил через алюминиевое окно, находящееся на конце ускорителя, и 10 см в воздухе до облучаемого объекта. Толщина сборки 1 см, пробег ионов, падающих на сборку 57,4 мм (в воде), что обеспечивало равномерное облучение по глубине детекторов и семян.

Для создания гипомагнитных условий (ГМУ) использовали цилиндрическую камеру рабочим объемом 35 л из магнитомягкого материала. Ее описание приведено в работе [14]. Величина ослабления ГМП в камере различна в разных точках ее объема, что позволяет получить различные кратности ослабления, в особенности при снятой боковой крышке. Величина геомагнитного поля в лабораторном помещении составляла около $(3{,}5 \div 4) \cdot 10^1$ мкТл, что несколько ниже ГМП на местности. Последнее обусловлено некоторым экранированием ГМП железобетонными конструкциями здания.

Семена проращивали в июне 2014 г. через 139 сут после облучения в чашках Петри при температуре 22 ± 0,5 °С на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой. Проросшими считали семена, имевшие корешки 2–4 мм, что соответствует 1-му митозу в корневой меристеме. Семена фиксировали в смеси ацетаталкоголя и окрашивали ацеторцеином. Для дальнейшего цитогенетического анализа при увеличении микроскопа в 945 раз использовали семена, проросшие через 24–26 ч после замачивания. В каждом варианте просматривали по 30 корешков. Учитывали ана-телофазы в меристеме корня. Частоту аберрантных клеток подсчитывали как обычно, т.е. как число клеток с повреждениями по отношению к общему числу делящихся клеток в данных фазах, выраженное в процентах. Отдельно учитывали хроматидные и хромосомные мосты и фрагменты, а также клетки с множественными аберрациями. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием t-критерия Стьюдента, как рекомендовано в монографии [15]. Энергию прорастания определяли как процент семян, проросших через 72 ч после замачивания. Всхожесть определяли аналогично – как процент семян, проросших через 7 сут.

Семена располагали в областях со следующими величинами магнитной индукции: $2 \cdot 10^1$ нТл (ослабление ГМП в $2{,}5 \cdot 10^3$ раз – варианты К1 и Ar1); $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл (ослабление ГМП в $3{,}6 \cdot 10^2$ раз – варианты К2 и Ar2); $1 \cdot 10^3$ нТл (ослабление ГМП в $5 \cdot 10^1$ раз – варианты К3 и Ar3), а также в лабораторных условиях – варианты КК и ArK. Количество семян, поставленных на проращивание, составило по вариантам: необлученных по 97–109, ArK – 53, Ar3 – 59 , Ar2 – 61, Ar1 – 70. Контролем служили необлученные семена, которые проращивали

Таблица 1

Результаты цитогенетических исследований проростков салата при прорастании в обычных и гипомагнитных условиях

Вариант	Количество просмотренных делящихся клеток (ана-, телофаз)	% аберрантных клеток	t-критерий Стьюдента для % аберрантных клеток
КК	3337	0,84 ± 0,16	–
К3	2992	1,50 ± 0,22*	2,43
К2	2316	1,21 ± 0,23	1,32
К1	2503	1,44 ± 0,24*	2,08
ArK	3027	2,35 ± 0,28***	4,68
Ar3	3389	2,42 ± 0,26 ***	5,18
Ar2	1488	2,02 ± 0,36**	3,0
Ar1	2710	6,05 ± 0,46***	10,7

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \le 0,05$; ** – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \le 0,01$; *** – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \le 0,001$.

Таблица 2

Результаты цитогенетических исследований проростков салата при прорастании в обычных и гипомагнитных условиях (множественные аберрации)

Вариант	Количество аберраций на 1 аберрантную клетку	% клеток с множественными аберрациями	t-критерий Стьюдента для % клеток с множественными аберрациями
КК	1,11	0,09 ± 0,05	–
К3	1,42	0,53 ± 0,13**	3,16
К2	1,39	0,47 ± 0,14*	2,56
К1	1,19	0,24 ± 0,10	1,34
ArK	1,44	0,86 ± 0,17***	4,35
Ar3	1,40	0,77 ± 0,15***	4,3
Ar2	1,37	0,67 ± 0,21**	2,69
Ar1	1,48	2,36 ± 0,29***	7,71

соответственно в таких же гипомагнитных условиях (варианты с маркировкой К). Для измерения магнитного поля использовали 3-компонентный магнитометр НВО-0599А.

Результаты и обсуждение

Все необлученные семена (варианты К) активно прорастали, с некоторым отставанием варианта К1. Через 48 ч все семена этого варианта также проросли, и энергия прорастания всех необлученных вариантов достигла 99–100 %. Из семян, облученных ионами аргона, более половины проросли на 1-е сутки, причем семена в гипомагнитной камере прорастали несколько активнее по сравнению с вариантом ArK. Однако несмотря на некоторое запаздывание прорастания облученных семян по сравнению с необлученными, к 7-м суткам их всхожесть составила 98–100 %, у варианта ArK – 94 % (рис. 1). Результаты цитогенетического анализа облученных и необлученных семян приведены в табл. 1 и 2. При проращивании необлученных семян в ГМУ наблюдается увеличение процента аберрантных клеток (см. табл. 1) с достоверным превышением у вариантов К1 и К3 ($p \le 0,05$) и увеличение процента клеток с множественными аберрациями (см. табл. 2) при всех трех режимах ослабления геомагнитного поля с достоверным превышением у варианта К3, прораставшего при величине магнитной индукции $1 \cdot 10^3$ нТл ($p \le 0,01$). Этот же вариант К3 характеризуется и максимальным количеством аберраций на 1 аберрантную клетку. Однако и семена, прораставшие при $1,4 \cdot 10^2$ нТл, т.е. при ослаблении геомагнитного поля в $3,6 \cdot 10^2$ раз, показали достоверное увеличение процента множественных аберраций при 5 %-ном уровне значимости. Среднее количество делящихся клеток на корешок в стадиях анафазы и телофазы у необлученных семян максимально у

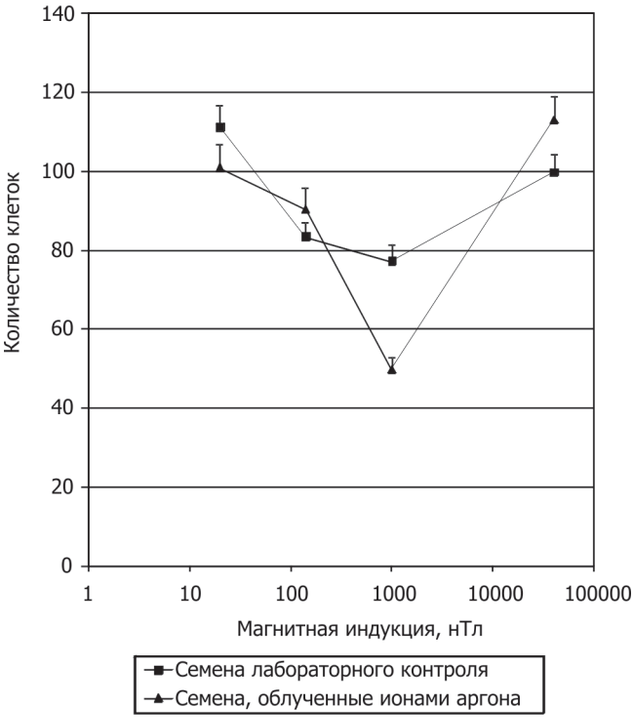


Рис. 2. Среднее количество делящихся клеток в стадиях ана-телофазы на один корешок

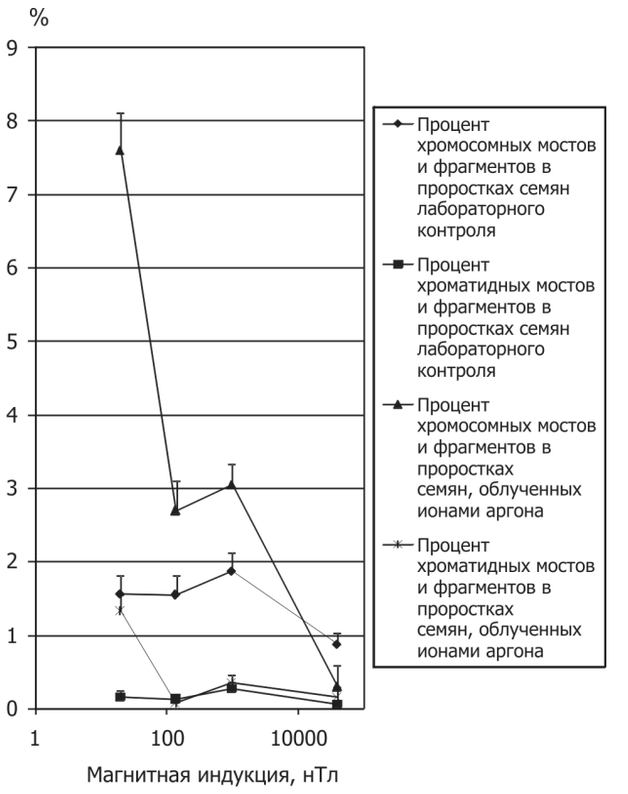


Рис. 3. Процент хромосомных и хроматидных повреждений в корневой меристеме проростков салата

контрольного варианта. При проращивании в ГМУ количество делящихся клеток оказалось минимальным при величине магнитной индукции $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл у семян варианта К2 (рис. 2). Заметим, что при проращивании в ГМУ необлученных семян также увеличивается процент хромосомных нарушений в клетках.

Семена салата, облученные ионами аргона, вариант ArK, достоверно отличаются от контроля (вариант КК) по уровню клеток с хромосомными аберрациями и клеток с множественными аберрациями ($p \leq 0{,}001$). При всех режимах проращивания семена, облученные ионами ^{40}Ar, имели повышенный уровень аберрантных клеток, достоверно отличающийся от необлученного контроля, проросшего в лабораторных условиях геомагнитного поля. При сравнении облученных семян не было отмечено значимых различий между облученным контролем (ArK) и вариантами, проросшими при $1 \cdot 10^3$ нТл и при $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл по критерию аберрантных клеток и клеток с множественными аберрациями. Вариант Ar1, проросший при $2 \cdot 10^1$ нТл, т.е. при максимальном из рассмотренных величин ослабления геомагнитного поля, показал увеличение (более чем в 2 раза) процента аберрантных клеток и клеток с множественными аберрациями. При величине магнитной индукции $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл было отмечено наименьшее число делящихся клеток в стадиях анафазы и телофазы у облученных и необлученных семян, у варианта Ar2 произошло снижение делящихся клеток более чем в 2 раза по отношению к варианту ArK, а у варианта К2 почти в 1,5 раза по отношению к контрольному варианту КК.

На рис. 3 представлены данные отдельно по хромосомным и хроматидным нарушениям в исследуемых вариантах. Отмечается преобладание хромосомных аберраций над хроматидными. У необлученных семян процент хромосомных мостов достоверно отличается от контроля при всех режимах прорастания, тогда как достоверные отличия по хроматидным нарушениям отмечаются только у варианта К3. При проращивании облученных семян при величинах магнитной индукции $1 \cdot 10^3$ нТл (вариант Ar3) и $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл (вариант Ar2) отмечается снижение более чем в 2 раза процента хроматидных мостов по сравнению с облученным вариантом, проросшим в лабораторных условиях, а процент хромосомных мостов и фрагментов находится на том же уровне. В то же время у варианта, проросшего при максимальном ослаблении геомагнитного поля в проведенном эксперименте ($2 \cdot 10^1$ нТл), отмечено достоверное превышение как хромосомных (более чем в 2 раза), так и хроматидных аберраций (более чем в 1,5 раза). У этого же варианта отмечено максимальное из рассмотренных количество аберраций на 1 аберрантную клетку (см. табл. 1), что является, как известно, показателем увеличения

тяжести повреждения наследственного аппарата клетки [16].

На рис. 4 представлены данные о хромосомных аберрациях, разделенные на группы по количеству аберраций в клетках. Среди необлученных семян клетки с тремя аберрациями встречаются только у вариантов, проросших при $1 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^1$ нТл. Все облученные семена имеют клетки с 3 аберрациями, причем наибольшее их количество встречается у варианта Ar1.

Повышение уровня хромосомных нарушений в ГМУ для облученных растений при возрастании дозы может быть критичным для выживания растений при превышении определенного порога. Так, для выживания проростков гороха *Pisum sativum* критическим уровнем является 44–48 % аберрантных анафаз [17].

Таким образом, можно констатировать следующее:

1. Семена, облученные ионами аргона, достоверно отличаются от необлученных семян, проросших в лабораторных условиях, по проценту хромосомных аберраций, клеток с множественными аберрациями, проценту хромосомных мостов и фрагментов при всех режимах ослабления ГМП.

2. При проращивании облученных семян при величинах магнитной индукции $1 \cdot 10^3$ нТл (Ar3) и $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл (Ar2) не обнаружено увеличения процента клеток с хромосомными аберрациями и клеток с множественными аберрациями в апикальной корневой меристеме по сравнению с облученными семенами, проросшими при лабораторных условиях.

3. При проращивании облученных семян при величинах магнитной индукции $2 \cdot 10^1$ нТл, т.е. максимальном из рассмотренных уровней ослабления геомагнитного поля, отмечено увеличение более чем в 2 раза процента клеток с хромосомными аберрациями и клеток с множественными аберрациями по сравнению с облученными семенами, проросшими при лабораторных условиях, причем совместное действие этих факторов значительно превышает простой суммарный эффект их раздельного действия (синергия).

4. Обнаружено уменьшение среднего количества делящихся клеток в стадиях анафазы и телофазы у облученных и необлученных вариантов, проросших при величине магнитной индукции $1{,}4 \cdot 10^2$ нТл, по сравнению с семенами, проросшими при лабораторных условиях, что может указывать на полиэкстремальную зависимость действия ГМУ от величины ослабления поля. На возможность такой зависимости было указано в работе [18].

Наблюдаемые эффекты повышения уровня хромосомных повреждений при $2 \cdot 10^1$ нТл могут быть связаны с затруднением репарации ДНК в условиях ослабления магнитного поля, что, возможно, связано со спиновым катализом. Если магнитные поля могут индуцировать спиновые триплет-синглетные переходы в паре радикалов или ион-радикалов, изменять их спиновое состояние и реакционную способность [19], то резкое снижение ГМП может затруднять такие процессы.

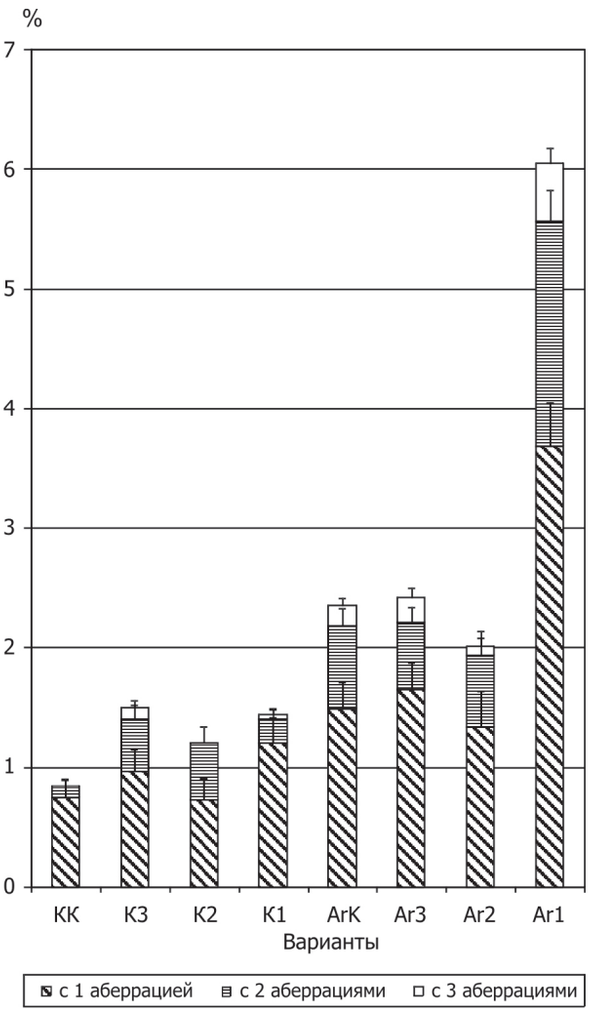


Рис. 4. Проценты хромосомных нарушений с 1, 2 и 3 аберрациями, расположенные в одном столбце варианта

Выводы

1. Не обнаружено существенного влияния проращивания в ГМУ на энергию прорастания и всхожесть необлученных и облученных ионами аргона семян салата.

2. Семена, облученные ионами ^{40}Ar с энергией 290 МэВ/нуклон в дозе 1 Гр, достоверно отличаются от контроля по проценту клеток с хромосомными аберрациями, с множественными аберрациями, хромосомными мостами и фрагментами.

3. При совместном действии тяжелых ионов высокой энергии и гипомагнитных условий при

величине магнитной индукции $2 \cdot 10^1$ нТл наблюдается увеличение процента аберрантных клеток и клеток с множественными аберрациями по сравнению с раздельным действием этих факторов, что свидетельствует о синергическом эффекте. Представляется целесообразным учитывать обнаруженный эффект синергизма при разработке оранжерей, предназначенных для лунной базы и дальних пилотируемых космических полетов.

Авторы выражают благодарность специалистам Национального института радиологических наук (NIRS, г. Чиба, Япония) за помощь в подготовке и проведения облучения и С.Ф. Смеловой за помощь в обработке биологического материала.

Работа частично выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН и при использовании оборудования, приобретенного НИИЯФ МГУ за счет Программы развития Московского университета.

Список литературы

1. *Казначеев В.П., Михайлова Л.П.* Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск, 1985.

Kaznacheev V.P., Mikhaylova L.P. Bioinformational function of natural electromagnetic field. Novosibirsk, 1985.

2. *Asashima M., Shimada R., Pfeifer C.J.* Magnetic shielding induced early developmental abnormalities in the newt Cynops pyrrhogaster // Bioelectromagnetics. 1991. V. 12. P. 215–224.

3. *Осипенко М.А., Межевикина Л.М., Крастс И.В. и др.* Влияние «нулевого» магнитного поля на рост эмбриональных клеток и ранних зародышей мыши в культуре in vitro // Биофизика. 2008. Т. 53. № 4. С. 705–712.

Osipenko M.A., Mezhevikina L.M., Krasts I.V. et al. Influence of «zero» magnetic field on the growth of embryonic cells and primary embryos of mouse in vitro // Biofizika. 2008. V. 53. № 4. P. 705–712.

4. *Труханов К.А., Гурьева Т.С., Дадашева О.А. и др.* Эмбриогенез японского перепела в гипомагнитных условиях применительно к дальним космическим полетам // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 2. С. 179–185.

Trukhanov K.A., Gurieva T.S., Dadasheva O.A. et al. Embriogenesis of the Japanese quail in hypomagnetic conditions applied to deep space flights // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2014. V. 54. № 2. P. 179–185.

5. *Лебедев В.М., Максимов Г.В., Максимов Е.Г. и др.* Использование 120-см циклотрона для исследования одновременного воздействия ионизирующего излучения и гипомагнитных условий на простейшие биологические объекты // Изв. РАН. Сер. физическая. 2014. Т. 78. № 7. С. 842–845.

Lebedev V.M., Maksimov G.V., Maksimov E.G. et al. Using a 120-cm cyclotron to study the synchronous effects of ionizing radiation and hypomagnetic conditions on the simplest biological objects // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. 2014. V. 78. № 7. P. 842–845.

6. *Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Смолянина С.О., Ерохин А.Н.* Космические оранжереи: настоящее и будущее. М., 2005.

Berkovich Yu.A., Krivobok N.M., Smolyanina S.O., Erokhin A.N. Space greenhouses: the present and the future. Moscow, 2005.

7. *Гущин В.И., Швед Д.М., Левинских М.А. и др.* Экопсихологические исследования в условиях 520-суточной изоляции // Авиакосм. и экол. мед. 2014. Т. 48. № 3. С. 25–29.

Gushchin V.I., Shved D.M., Levinskikh M.A. et al. Ecopsychological investigations in 520-day isolation // Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina. 2014. V. 48. № 3. P. 25–29.

8. *Nevzgodina L.V.* Chromosomal aberrations as a biomarker for cosmic radiation // Fundamentals for the assessment of risks from environmental radiation / C. Baumstark-Khanet et al., eds. 1999. P. 203–208.

9. *Красавин Е.А., Козубек С.* Мутагенное действие излучений с разной ЛПЭ. М., 1991.

Krasavin E.A., Kozubek S. Mutagenic activity of radiation with different LET. Moscow, 1991.

10. *Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г.* Межпланетные и орбитальные космические полеты. Радиационный риск для космонавтов. Радиобиологическое обоснование. М., 2009.

Shafirkin A.V., Grigoryev Yu.G. Interplanetary and orbital space flights. The radiation risk to astronauts. Radiobiological basis. Moscow, 2009.

11. *Platova N.G., Smelova S.F., Akatov Yu. A., Arhangelsky V.V.* Cytogenetic effects in cells of lettuce seedlings after exposure to accelerated helium, carbon, silicon and iron ions // 4th International workshop on space radiation research and 17th annual NASA space radiation health investigators workshop. Dubna, 2006. P. 100–101.

12. *Невзгодина Л.В., Григорьев Ю.Г., Маренный А.М.* Действие тяжелых ионов на биологические объекты. М., 1990.

Nevzgodina L.V., Grigoryev Yu.G., Marenny A.M. Effect of heavy ions on biological objects. Moscow, 1990.

13. *Torikoshi I., Minohara S., Kanematsu N. et al.* Irradiation system for HIMAC // J. Radiat. Res. 2007. V. 48. P. 15–25.

14. *Гудошников С.А., Венедиктов С.Н., Гребенщиков Ю.Б. и др.* Экранирующая камера для ослабления магнитного поля Земли на основе рулонных магнитных материалов // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 58–61.

Gudoshnikov S.A., Venediktov S.N., Grebenshchikov Yu.B. et al. A screening chamber for attenuating the Earth magnetic field based on roll magnetic materials // Izmeritelnaya tekhnika. 2012. № 3. P. 58–61.

15. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М., 1980.

Lakin G.F. Biometry. Moscow, 1980.

16. *Федоренко Б.С., Ворожцова С.В, Герасименко В.Н. и др.* Цитогенетические нарушения в клетках экспериментальных животных и человека при действии ускоренных заряженных частиц и космического излучения // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1999. Т. 30. № 2. С. 470–522.

Fedorenko B.S., Vorozhtsova S.V., Gerasimenko V.N. et al. Cytogenetic damages in cells of experimental animals and a man under effect of the accelerated charged particles and space radiation // Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra. 1999. V. 30. № 2. P. 470–522.

17. *Кравец Е. А., Михеев А.Н., Овсянникова Л.Г., Гродзинский Д.М.* Критический уровень радикального повреждения апикальной меристемы корня и механизмы ее восстановления у *Pisum sativum* // Цитология и генетика. 2011. Т. 43. № 1. С. 24–34.

Kravets E.A., Mikheev A.N., Ovsyannikova L.G., Grodzinsky D.M. Critical level of radiation damage of root apical meristem and mechanisms for its recovery in *Pisum sativum* // Tsytologiya i genetika. 2011. V. 43. № 1. P. 24–34.

18. *Труханов К.А.* Космические проблемы магнитобиологии // Труды Междунар. конф. «Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле». 2012. Т. 1. С. 249–268.

Trukhanov K.A. Problems of cosmic magnetobiology // Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii «Vliyanie kosmicheskoi pogodi na cheloveka: v kosmose i na Zemle». 2012. V. 1. P. 249–268.

19. *Бучаченко А.Л.* Магнитно-зависимые молекулярные и химические процессы в биохимии, генетике и медицине // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 1. С. 1–12.

Buchachenko A.L. Magnetic field-dependent molecular and chemical processes in biochemistry, genetics and medicine // Uspekhi khimii. 2014. V. 83. № 1. P. 1–12.

Поступила 12.05.2015

CHROMOSOMAL DISORDERS IN LETTUCE SEEDS DUE TO COMBINED SEQUENTIAL EXPOSURE TO ACCELERATED IONS OF ARGON AND HYPOMAGNETIC ENVIRONMENT

Platova N.G., Lebedev V.M., Spassky A.V., Tolochek R.V., Trukhanov K.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 35–41

Results of separate and combined exposure of Lactuca sativa L. seeds to argon nuclei of 290 MeV/nucleon (linear energy transfer about $1.1 \cdot 10^2$ keV/μm) and attenuated geomagnetic field (i.e. imitation of the conditions peculiar for the Moon and remote space) are reported. Absorbed dose amounted to 1 Gy; compared with the Moscow region (around $5 \cdot 10^2$ μTl), the geomagnetic field was attenuated in $2.5 \cdot 10^3$; $3.6 \cdot 10^2$ and $5 \cdot 10^1$ times respectively. Ana-telophase analysis of the root meristem first mitosis evidenced the highest percent of aberrant cells in irradiated seeds that germinated in $2.5 \cdot 10^3$-fold attenuated geomagnetic field, this fact implies a synergic effect of 2 factors.

Key words: remote space missions, heavy ions, hypomagnetic environment, combined biological effect, *Lactuca sativa*, lettuce seeds, chromosomal aberrations.

КЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.014.462.2.08:546.11:537.635

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕЙТЕРИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ С ПОМОЩЬЮ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ

Джимак С.С.[1], Басов А.А.[2], Федулова Л.В.[1], Быков И.М.[2], Ивлев В.А.[3], Мелконян К.И.[2], Тимаков А.А.[4]

[1]ФГБНУ «ВНИИМП им. В.М. Горбатова», Москва
[2]ГБОУ ВПО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Краснодар
[3]ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва
[4]ООО «МТК "Айсберг"», Москва

E-mail: jimack@mail.ru

Одной из основных задач авиакосмической медицины является разработка эффективной системы жизнеобеспечения космонавтов, включающей создание бортового устройства для получения воды с пониженным содержанием дейтерия, что требует создания эффективных способов мониторинга изотопного состава биологических жидкостей. В работе с помощью ЯМР-спектроскопии получены данные изотопного (D/H) состава некоторых биожидкостей у женщин в период лактации. Продемонстрирована высокая эффективность разработанной методики определения концентрации дейтерия в жидкостях с помощью ЯМР-спектроскопии с использованием трифторметансульфоната европия (III). На основании выполненных исследований установлено, что в естественных условиях концентрация дейтерия в различных биологических жидкостях организма достоверно отличается, что сопровождается формированием изотопного (D/H) градиента (δD слюны >> δD плазмы крови > δD женского грудного молока). Следует отметить, что при потреблении питьевой воды с δD, равной 60 ppm, изотопный (D/H) градиент сохранился (δD слюны > δD плазмы крови ≥ δD женского грудного молока), но абсолютные различия между содержанием дейтерия в биологических жидкостях уменьшились более чем в 2 раза. При этом наибольшая обратная корреляция в соответствующих биологических жидкостях среди органических компонентов (r = -0,77) отмечена между концентрацией дейтерия и содержанием липидов. В целом предложенный способ ЯМР-спектроскопии позволяет эффективно проводить неинвазивное (в смешанной слюне, грудном молоке) определение содержания дейтерия.

Ключевые слова: биологические жидкости, неинвазивный мониторинг, дейтерий, ЯМР-спектроскопия, изотопный градиент.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 42–47.

Изотопный состав органогенных элементов варьируется в объектах различного характера как по причинам географических факторов, так и ввиду радиоактивных превращений, кинетических и термодинамических изотопных эффектов. Причем фракционирование изотопов в природе сильнее выражено у тех элементов, которые принимают более активное участие в круговороте веществ неорганического и органического мира (кислород, водород, углерод, азот, сера). Наиболее широким диапазоном вариаций обладает водород [1–3].

Вода оказывает влияние практически на все биохимические и биофизические процессы в организме [4–6]. В частности, вода с искусственно измененным содержанием дейтерия оказывает существенное влияние на метаболические процессы в живых системах [7, 8]. Это характерно для воды не только с увеличенным на порядки содержанием этого изотопа, но и с пониженным в 2–3 раза относительно среднемирового (≈ 155 ppm) [9]. При употреблении воды с пониженным содержанием дейтерия длительное время (не менее 30 сут) в объеме не менее 1 л в сутки наблюдается снижение концентрации (δ) указанного изотопа в плазме крови и тканях органов живых организмов [7].

Так, несколько работ различных исследовательских групп посвящены изучению роста клеточных онкокультур в питательных средах, приготовленных на воде с пониженным содержанием дейтерия [10, 11]. Некоторыми авторами отмечается, что обедненная по дейтерию вода обладает иммуномодулирующими свойствами [12]. Одним из последних научных направлений в этой области знания, активно развивающейся во всем мире, является изучение влияния воды с пониженным содержанием дейтерия на состояние прооксидантно-антиоксидантной системы, являющейся звеном системы неспецифической защиты организма [9].

Известно, что одной из основных задач авиакосмической медицины является разработка эффективной системы жизнеобеспечения, включающей создание бортового устройства для получения воды с пониженным содержанием дейтерия [13]. Это связано с тем, что освоение дальнего космоса, в том числе реализация марсианской программы, будет проходить в условиях воздействия повышенных радиационных нагрузок на экипаж. Поэтому при колонизации Марса и других планет в рамках обеспечения радиационной безопасности участников экспедиции целесообразно введение в питьевой рацион воды с пониженным содержанием дейтерия, так как снижение концентрации ^{2}H в крови обеспечивает увеличение ее радиопротекторных свойств. Учитывая вышеизложенное, изучение особенностей фракционирования изотопов водорода не только в крови, но и в других биологических жидкостях (смешанной слюне, грудном молоке), представляет интерес как для создания неинвазивных методов мониторинга состояния астронавтов [14], так и для разработки некоторых аспектов радиационной безопасности в лактационном периоде новорожденных за пределами земного пространства.

Количественная ЯМР-спектроскопия является одним из основных прецизионных методов анализа концентрации дейтерия в биологических жидкостях [15], которая, благодаря простоте процедур пробоподготовки и аналитического процесса, может быть использована в качестве экспресс-метода в экспериментальной и клинической практике, например, при мониторинге процессов изотопного (D/H) обмена у лиц, использующих в пищевом рационе продукты с модифицированным изотопным составом с профилактической или лечебной целью.

Целью данного исследования было изучение с помощью ЯМР-спектроскопии изотопного соотношения (D/H) в различных биологических жидкостях для разработки неинвазивных методов мониторинга содержания тяжелых изотопов в организме, в том числе при использовании в пищевом рационе воды с пониженным содержанием дейтерия.

Методика

В работе использован спектрометр ЯМР (JNM-ECA 400), который имел следующие характеристики: индукция постоянного магнитного поля, равная 9,389766 Тл; диапазон частот от 10 до 400 МГц, с шагом 0,01 Гц; резонансная частота ядер ^{2}D 61,371 МГц.

Для исследуемого образца использовалась откалиброванная основная ампула диаметром 4,97 ± 0,013 мм и длиной 178 мм. В нее помещалось исследуемое на изотопный состав вещество. Внутренняя ампула (коаксиальный внешний стандарт) с длиной концевого капилляра 32 мм и емкостью 40 мкл являлась вставкой в основную ЯМР-ампулу и содержала воду с известным изотопным составом. Внутренняя ампула содержала добавку растворенного трифторметансульфоната европия (III), благодаря которому сигнал ЯМР ^{2}H воды внутренней ампулы был смещен относительно сигнала определяемого вещества из основной ампулы. Это позволяло провести интегрирование отдельных сигналов спектра относительно друг друга. Использовался ряд калибровочных образцов чистой воды (содержание примесей не более 0,01 % по массе) с известным содержанием дейтерия в соответствии с международным стандартом, введенным МАГАТЭ VSMOW и SLAP.

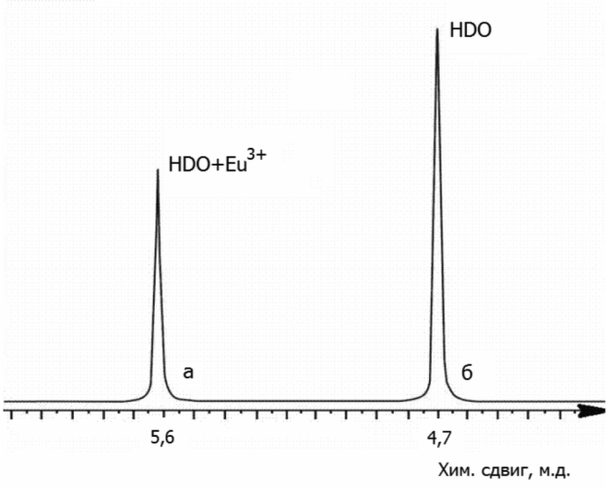


Рисунок. Спектр ЯМР-сигнала дейтерия в исследуемом образце биожидкости (б) относительно эталона со сдвигающим реагентом (а)

Для определения отношения $^{2}H/^{1}H$ во внутреннюю ампулу помещался образец воды с содержанием $(CF_3SO_3)_3Eu$, равным (0,045 ± 0,005) моль/л, при этом содержание дейтерия воды в данном растворе соответствовало исследуемому диапазону концентраций дейтерия измеряемого объекта (типичный получаемый спектр представлен на рисунке). Содержание других примесей не превышало 0,01 % по массе. Для приготовления растворов использовали дозаторную микропипетку на 1 мл с шагом в 0,010 мл со сменными наконечниками и лабораторные аналитические весы с пределом допускаемой погрешности однократного взвешивания ± 0,0005 г. Все эксперименты в рамках серии образцов, включая калибровочные, проводились в одинаковых условиях и с одинаковыми настройками прибора. Для измерений на ядрах ^{2}H были подобраны оптимальные значения: усиление 60; смещение 5 м.д.; развертка 10 м.д.; время наблюдения спада свободной индукции 6 с; число сканирований 256; релаксационная задержка $10 \cdot T_1(^2D_2O) \geq 7$ с; температура внутри резонатора 25 °С. Полученные результаты были представлены

Таблица

Содержание дейтерия в биологических жидкостях при физиологических условиях и использовании в рационе обедненной по дейтерию воды

Группы обследованных	Показатели		
	Плазма крови, ppm	Слюна, ppm	Женское грудное молоко, ppm
1	144,3 ± 0,6	159,8 ± 0,4*	141,6 ± 0,4*
2	128,5 ± 0,8^	134,9 ± 1,2*,^	127,2 ± 0,7^

Примечание. * – $p < 0,05$ в сравнении показателями плазмы крови; ^ – $p < 0,05$ в сравнении с показателями группы 1.

в ppm (здесь и далее указано содержание по дейтерию). Определение концентрации дейтерия в этих же образцах также проводили в Центре прецизионных методов анализа Российского университета дружбы народов на спектрометре JEOL JNM ECA 600 по стандартной методике измерения абсолютных интенсивностей без использования внешнего эталона.

Содержание ^{2}H измеряли в биологических субстратах: слюне (СЛ), плазме крови (ПК), женском грудном молоке (ЖГМ) у 2 групп родильниц. В группу 1 (n = 14) были включены женщины, потреблявшие обычный пищевой рацион, в группу 2 (n = 8) – женщины, потреблявшие кроме обычного пищевого рациона питьевую воду со сниженным содержанием дейтерия (60 ppm, производства ООО «МТК "Айсберг"», Москва, РФ, свидетельство о государственной регистрации RU.77.99.19.006.E.028090.07.11 от 20.07.2011 г.) в объеме 1,5–2 л в сутки в течение 25–30 сут до начала обследования.

Перед проведением анализа изотопного состава биологических жидкостей выполняли предварительную пробоподготовку, включающую центрифугирование (центрифуга minispin Eppendorf) крови 1500 оборотов в минуту (об/мин) в течение 15 мин; ЖГМ и СЛ при 3000 об/мин в течение 15 мин. При указанных параметрах центрифугирования в биологических жидкостях сохраняются основные белки, липиды и углеводы. Исследование проводили в соответствии с требованиями, регламентируемыми существующей нормативной базой медико-биологических исследований с участием человека, представленной в ФЗ «Об охране здоровья граждан» от 27.02.2003 г.

Статистическую обработку осуществляли с использованием R Development Core Team (2008), достоверным считали различие при $p < 0,05$. Для оценки корреляционных взаимосвязей использовали коэффициент Пирсона (r).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что в физиологических условиях у обследованных имеется градиент содержания дейтерия в биологических жидкостях (слюна >> плазма крови > женское грудное молоко) с достоверным отличием показателей (таблица). Известно, что концентрации дейтерия в естественных условиях в воде, белках, липидах и углеводах имеют существенные различия, что обусловлено разной скоростью реакций изотопного (D/H) обмена в разных химических связях у биомолекул. Изотопный (D/H) обмен в естественных условиях наиболее выражен в связях –OH, –SH, $–NH_2$ (=N–H), но практически отсутствует в связях $–R_2C–H$. Поэтому с целью уточнения причины возникновения описанного выше изотопного D/H градиента был проведен корреляционный анализ взаимосвязи содержания дейтерия в биологических жидкостях и биохимического состава плазмы крови, слюны и женского грудного молока.

По данным литературы содержание в плазме крови белков составляет от 6,5 до 8,5 %, липидов – около 0,5–1,0 %, углеводов – около 0,1 %, тогда как в слюне и человеческом грудном молоке эти показатели отличаются от указанных выше в несколько раз. Больше всего липидов среди изученных объектов исследования содержится в человеческом грудном молоке (около 4 %), тогда как в слюне они практически отсутствуют (0,006–0,007 %) [16–18]. Содержание белков в плазме крови существенно выше, чем в человеческом грудном молоке (около 1,0 %) и слюне (около 0,1 %). При этом содержание углеводов в человеческом грудном молоке в десятки раз превосходит аналогичные показатели в плазме и составляет около 6,9 %, тогда как в слюне эти показатели на 2 порядка ниже (около 0,03 %). В результате проведенного корреляционного анализа было установлено, что имеется прямая корреляционная зависимость между содержанием в биологических жидкостях воды и показателями дейтерия: принимая во внимание значения референтного интервала (максимум и минимум), r колебался в диапазоне от 0,85 до 0,99 ($p < 0,05$). Тогда как между содержанием органических компонентов в биологических жидкостях и показателями дейтерия была выявлена обратная взаимосвязь: для белков r составил от -0,45 до -0,50, для углеводов r – -0,62, для липидов r – от -0,69 до -0,77 ($p < 0,05$), что указывает на зависимость концентрации дейтерия, прежде всего, от питьевого рациона и в меньшей степени от

содержания органических молекул, за исключением молекул липидной природы, для которых характерны высокие показатели r. Это можно объяснить наиболее низкой интенсивностью изотопного (D/H) обмена в гидрофобных (неполярных) радикалах липидов, которые даже в условиях потребления воды с различным изотопным составом вносят стабильный вклад в конечную концентрацию дейтерия. Кроме того, подобные взаимосвязи содержания биомолекул и дейтерия необходимо учитывать при разработке алгоритмов неинвазивной оценки содержания тяжелых нерадиоактивных изотопов в организме, в том числе дейтерия, так как биохимический состав биологических жидкостей может быть достаточно вариабельным в зависимости от образа жизни человека (характера питания, физической активности и других факторов). Однако полностью объяснить различия изотопного состава только особенностями биохимического состава указанных биожидкостей не представляется возможным, что связано с недостаточной изученностью механизмов регуляции изотопного обмена у живых существ.

Различия изотопного состава ПК, СЛ и ЖГМ могут быть также обусловлены изменениями скорости метаболических процессов в организме, когда в условиях повышенной энергопродукции происходит усиленное образование воды внутри клеток из изотопов водорода, входящих в состав биологических субстратов окисления (т.е. различных классов органических соединений). Вода, образующаяся при окислительных процессах внутри клетки, может достоверно отличаться по содержанию дейтерия от внеклеточной воды, пополняемой в организме преимущественно из рациона. Другой вероятной причиной возникновения указанного физиологического изотопного градиента является возможное наличие селективных механизмов поступления тяжелых изотопов через гистогематические барьеры, например, гематосаливарный и гематолактационный. Основной функцией последнего является регуляция проницаемости для физиологически необходимых веществ при образовании грудного молока, кроме того, он является одним из ключевых механизмов защиты грудного ребенка в случае поступления токсических веществ в кровь матери.

В группе 2, потреблявшей воду со сниженным содержанием дейтерия, отмечали достоверное уменьшение дейтерия (см. табл.): в плазме крови – на 10,9 % ($p < 0,05$ в сравнении с показателями в группе 1), в слюне – на 15,6 % ($p < 0,05$), человеческом грудном молоке – на 10,2 % ($p < 0,05$). Следует отметить, что хотя в группе 2 и сохранился изотопный (D/H) градиент (δD слюны > δD плазмы крови ≥ δD женского грудного молока), абсолютные различия между содержанием дейтерия в биологических жидкостях уменьшились более чем в 2 раза при отсутствии достоверных отличий показателей в крови и человеческом грудном молоке. Такая динамика концентрации дейтерия может свидетельствовать в том числе об уменьшении содержания дейтерия в воде, входящей в состав изученных биожидкостей, при его практически неизменном содержании в указанных выше органических субстратах, а также о возможно меньших колебаниях внутриклеточных концентраций дейтерия, прежде всего в клетках, синтезирующих грудное молоко, что объясняется преимущественным образованием в лактоцитах из органических субстратов, а не поступлением ее из плазмы крови [19]. При этом процент внутриклеточной воды, образующейся непосредственно в клетке, например, в результате процессов восстановления кислорода в митохондриях до воды, может существенно отличаться как в различных тканях (что объясняется их различной метаболической активностью), так и в одной и той же ткани при изменении интенсивности реакций обмена веществ в процессе ее жизнедеятельности.

При верификации результатов измерений содержания дейтерия в биологических жидкостях по методике измерений абсолютных интенсивностей получены аналогичные показатели по изотопному градиенту, различия в полученных результатах для аналогичных биожидкостей составили менее 3 ppm, что указывает на высокую точность предлагаемого метода. Кроме того, благодаря использованию новых методологических подходов с применением лантаноидных сдвигающих реагентов, удалось значительно сократить время проведения эксперимента.

Выводы

1. Разработанные методы измерения изотопных соотношений методом ЯМР с применением зондов, содержащих сдвигающий реагент, могут быть направлены на решение проблем экологии и скрининга состояния человека, а именно при экспресс-контроле изотопного состава жидкостей природного происхождения, а также для мониторинга концентрации дейтерия в организме при употреблении продуктов с модифицированным изотопным составом.
2. В биологических жидкостях человека в физиологических условиях имеется изотопный D/H градиент (δD слюны >> δD плазмы крови > δD женского грудного молока), наличие которого обусловлено в том числе содержанием воды и особенностями биохимического состава этих биожидкостей. Наибольшую обратную корреляцию среди органических компонентов ($r = -0,77$) отмечали между концентрацией дейтерия и содержанием липидов в соответствующих биологических жидкостях.
3. При использовании в рационе воды со сниженным содержанием дейтерия большее изменение его концентрации наблюдали в слюне и плазме крови, тогда как колебания концентрации дейтерия

в грудном молоке были достоверно меньше. При этом отмечали уменьшение абсолютных значений градиента (D/H): δD слюны > δD плазмы крови ≥ δD женского грудного молока.

4. Полученные данные могут быть использованы для разработки неинвазивного мониторинга изотопного D/H состава биологических жидкостей у космонавтов при потреблении в рационе жидкости с пониженным содержанием дейтерия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 15-16-00008.

Список литературы

1. *West J.B., Bowen G.J., Cerling T.E., Ehleringer J.R.* Stable isotopes as one of nature's ecological recorders // Trends in Ecology and Evolution. 2006. V. 21. № 7. P. 408–414.

2. *Podlesak D.W., Torregrossa A., Ehleringer J.R. et al.* Turnover of oxygen and hydrogen isotopes in the body water, CO2, hair, and enamel of a small mammal // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. V. 72. P. 19–35.

3. *Быков М.И., Джимак С.С., Басов А.А. и др.* Сравнительная характеристика изотопного D/H состава и антиоксидантной активности свежевыжатых соков из овощей и фруктов, выращенных в различных географических регионах // Вопросы питания. 2015. Т. 84. № 4. С. 89–96.

Bykov M.I., Dzhimak S.S., Basov A.A. et al. Comparative characteristics of the isotopic D/H composition and antioxidant activity of fresh juices of fruits and vegetables grown in different geographical regions // Voprosy pitaniya. 2015. V. 85. № 4. P. 89–96.

4. *Назаров Н.М., Синяк Ю.Е., Ефременко Е.Н. и др.* Влияние легкоизотопной воды на рост бактериальной культуры // Авиакосм. и экол. мед. 2011. Т. 45. № 3. С. 63–66.

Nazarov N.M., Sinyak Yu.E., Efremenko E.N. et al. Effect of light-isotope water on growth of bacterial culture // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2011. V. 45. № 3. P. 63–66.

5. *Bunkin A.F., Pershin S.M., Khusainova R.S., Potekhin S.A.* Spin isomeric selectivity of water molecules upon DNA hydration // Biophysics. 2009. V. 54. № 3. P. 275–279.

6. *Sinyak Yu., Grigoriev A., Gaydadimov V. et al.* Deuterium-free water (1H2O) in complex life-support systems of long-term space missions // Acta Astronautica. 2003. V. 52. P. 575–580.

7. *Басов А.А., Быков И.М., Барышев М.Г. и др.* Концентрация дейтерия в пищевых продуктах и влияние воды с модифицированным изотопным составом на показатели свободнорадикального окисления и содержание тяжелых изотопов водорода у экспериментальных животных // Вопросы питания. 2014. Т. 83. № 5. С. 43–50.

Basov A.A., Bykov I.M., Baryshev M.G. et al. Determination of deuterium concentration in foods and influence of water with modified isotopic composition on oxidation parameters and heavy hydrogen isotopes content in experimental animals // Voprosy pitaniya. 2014. V. 83. № 5. P. 43–50.

8. *Avila D.S., Somlyai G., Somlyai I., Aschner M.* Anti-aging effects of deuterium depletion on Mn-induced toxicity in a C. elegans model // Toxicology Letters. 2012. V. 211. P. 319–324.

9. *Dzhimak S.S., Barishev M.G., Basov A.A., Timakov A.A.* Influence of deuterium depleted water on freeze dried tissue isotopic composition and morphofunctional body performance in rats of different generations // Biophysics. 2014. V. 59. P. 614–619.

10. *Cong F., Zhang Y., Sheng H. et al.* Deuterium-depleted water inhibits human lung carcinoma cell growth by apoptosis // Experimental and therapeutic medicine. 2010. V. 1. P. 277–283.

11. *Wang H., Zhu B., He Z. et al.* Deuterium-depleted water (DDW) inhibits the proliferation and migration of nasopharyngeal carcinoma cells in vitro // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2013. V. 67. P. 489–496.

12. *Абросимова А.Н., Раков Д.В., Синяк Ю.Е.* Влияние «легкой» воды на развитие помутнений хрусталика у мышей после многократного гамма-облучения в низких дозах // Авиакосм. и экол. мед. 2009. Т. 43. № 2. С. 29–32.

Abrosimova A.N., Rakov D.V., Sinyak Yu.E. The «light» water effect on lenticular opacity development in mice after repeated low dose gamma-irradiation // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2009. V. 43. № 2. P. 29–32.

13. *Синяк Ю.Е., Турусов В.С., Григорьев А.И. и др.* Возможность использования бездейтериевой воды в марсианской экспедиции // Авиакосм. и экол. мед. 2003. Т. 37. № 6. С. 60–63.

Siniak Yu.E., Turusov V.S., Grigoriev A.I. et al. Consideration of the deuterium-free water supply to an expedition to Mars // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2003. V. 37. № 6. P. 60–63.

14. *Григорьев А.И., Егоров А.Д., Козловская И.Б., Шипов А.А.* Вопросы диагностики и профилактики в марсианском полете // Авиакосм. и экол. мед. 2003. Т. 37. № 2. С. 22–31.

Grigoriev A.I., Kozlovskaya I.B., Egorov A.D., Shipov A.A. Problems of diagnostics and prophylaxis in a Martian flight // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2003. V. 37. № 2. P. 22–31.

15. *Xiaomin M., Pengchi D., Xiaoyan W. et al.* Direct determination of deuterium of wide concentration range in water by NMR // Talanta. 2012. V. 97. P. 450–455.

16. *Bruce S.J., Rey F., Béguin A. et al.* Discrepancy between radioimmunoassay and high performance liquid chromatography tandem mass-spectrometry for the analysis of androstenedione // Analytical Biochemistry. 2014. V. 455. P. 20–25.

17. *Hsu Y., Chen C., Lin M. et al.* Changes in preterm breast milk nutrient content in the first month // Pediatrics and Neonatol. 2014. V. 55. P. 449–454.

18. Аналитические подходы к изучению показателей метаболизма в ротовой жидкости / Ф.Н. Гильмиярова и др., ред. М., 2006.

Analytical approaches to the study of indicators of metabolism in oral fluid / F.N. Gilmiyarova et al., eds. Moscow, 2006.

19. *Kreuzer-Martin H.W., Lott M.J., Ehleringer J.R., Hegg E.L.* Metabolic processes account for the majority of the intracellular water in log-phase Escherichia coli cells as revealed by hydrogen isotopes // Biochemistry. 2006. V. 45. P. 13622–13630.

Поступила 22.10.2015

DETERMINATION OF DEUTERIUM CONCENTRATION IN BIOLOGICAL LIQUIDS WITH THE USE OF NMR-SPECTROSCOPY

Dzhimak S.S., Basov A.A., Fedulova L.V., Bykov I.M., Ivlev V.A., Melkonyan K.I., Timakov A.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 42–47

One of the major goals of aerospace medicine is development of an advanced system of human life support including a technology of producing deuterium-depleted water which, in its turn, requires monitoring of the isotopic composition of bio-liquids. NMR-spectroscopy enabled acquisition of data about the isotopic composition (D/H) of some bio-liquids of lactating females. High effectiveness of the method of measuring deuterium in liquids using NMR-spectroscopy and Europium (III) trifluormethanesulphonate was demonstrated. According to the investigations, deuterium concentration in natural bio-liquids varies significantly bringing about an isotope (D/H) gradient (saliva δD >> blood plasma δD > mother's milk δD). It is noteworthy that consumption of potable water with δD = 60 ppm did not alter the isotope (D/H) gradient (saliva δD > blood plasma δD ≥ δD mother's milk); however, absolute difference in deuterium concentrations in bio-liquids decreased by more than a half. The largest invert correlation of organic components in the liquids under study (r = -0.77) was observed between deuterium and lipids. By and large, NMR-spectroscopy allows non-invasive determination of the deuterium content in mixed saliva and mother's milk.

Key words: biological liquids, non-invasive monitoring, deuterium, NMR-spectroscopy, isotope gradient.

УДК 613.691

ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЛАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ИНГАЛЯЦИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КСЕНОНА В ПРОЦЕССЕ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СБОРОВ

Кальманов А.С.[1], Макаров Е.В.[1], Шишкин А.Н.[1], Писарев А.А.[1], Бубеев Ю.А.[2]

[1]«Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил» Министерства обороны Российской Федерации, Москва
[2]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail:saniyasin@gmail.com

Целью работы являлось проведение плацебо контролируемого исследования влияния курсового применения ингаляций терапевтической ксеноно-кислородной газовой смеси на показатели функционального состояния специалистов-водолазов в процессе интенсивных учебно-тренировочных сборов.

В исследовании приняло участие 18 специалистов-водолазов (возраст 30 ± 2,2 года), проходивших профессиональную подготовку на учебной базе г. Новороссийска. Испытуемые были разделены на 3 равные группы (n = 6): экспериментальную, контрольную и плацебо. Добровольцам опытной группы проводились ингаляции ксеноно-кислородной газовой смеси (25 % Xe и 75 % O_2), испытуемым группы плацебо-контроля выполнялись ингаляции умеренно гипероксигенированной воздушной смеси. Функциональное состояние оценивалось с помощью анализа показателей гемодинамики, вариабельности сердечного ритма, субъективного состояния, а также проведения ряда функциональных проб.

Установлено, что курс ингаляций ксеноно-кислородной газовой смеси способствовал снижению активности симпатоадреналовой системы у водолазов, приводил к нормализации их субъективного состояния, а также повышал устойчивость организма к физическим нагрузкам.

Ключевые слова: газовые смеси на основе ксенона, функциональное состояние, водолазы, физическая работоспособность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 48–54.

Деятельность специалистов-водолазов, выполняющих подводно-технические и аварийно-спасательные работы, связана с воздействием на организм ряда экстремальных факторов, которые являются неустранимыми элементами их профессии. Высокие физические нагрузки, особый характер рабочей среды и используемых дыхательных газовых смесей, физиолого-гигиенические параметры водолазного снаряжения, сложность и ответственность задач, выполняемых на различных глубинах, а также осознание реальной угрозы для жизни или здоровья – весь этот комплекс факторов формирует специфические условия и особенности труда, которые непосредственно влияют на функциональное состояние организма водолаза [1, 2].

Наличие непосредственной связи между уровнем функционального состояния и качеством профессиональной деятельности обусловливает необходимость проведения мероприятий по своевременной диагностике и коррекции негативных последствий, возникающих в процессе выполнения служебных задач.

Одним из инновационных методов оперативного восстановления уровня функционального состояния специалистов-водолазов может стать использование газовых смесей на основе ксенона.

К настоящему времени установлено, что ингаляция газовой смеси ксенона и кислорода в терапевтических дозах (не приводящих к утрате сознания и наступлению наркоза при любом времени экспозиции) обладает выраженным нейро- и кардиопротективным эффектом. Курсовое использование подобных смесей сопровождается седативным, антистрессорным и анальгетическим действием [3, 4].

Многоцентровые клинические исследования, проведенные как в России, так и за рубежом, подтвердили безопасность использования ксенона, а также позволили создать полноценную нормативно-правовую базу для внедрения этого индифферентного газа в широкую медицинскую практику. Предпринимаются успешные попытки применения ксеноно-кислородных газовых смесей в комплексном лечении дисциркуляторных и ишемических заболеваний головного мозга, в терапии острого инфаркта миокарда, в качестве элемента комплексной терапии лиц с патологическими аддикциями, при купировании проявлений острых и хронических стрессовых расстройств [3]. Значительную популярность приобрели ингаляции терапевтических концентраций ксенона для ускоренного восстановления физической работоспособности различных категорий лиц опасных профессий [4].

Таким образом, в современной медицине накоплен значительный эмпирический материал, связанный с разнообразными аспектами терапевтического применения ксеноно-кислородных газовых смесей. Тем не менее практическое использование ксенона зачастую опережает наше понимание механизмов его действия на организм человека. В частности, в литературе приводится очень мало данных о комплексном влиянии этого инертного газа на функциональное состояние человека, подверженного воздействию различных нетипичных и экстремальных факторов трудовой деятельности.

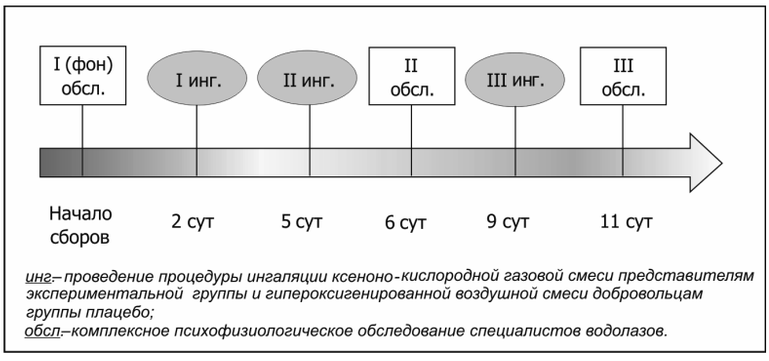


Рисунок. Циклограмма проведения исследований.
Инг. – проведение процедуры ингаляции ксеноно-кислородной газовой смеси представителям экспериментальной группы и гипероксигенированной воздушной смеси добровольцам группы плацебо; обсл. – комплексное психофизиологическое обследование специалистов-водолазов

Целью данной работы явилось проведение плацебо-контролируемого исследования влияния курсового применения ингаляций терапевтической ксеноно-кислородной газовой смеси на показатели функционального состояния специалистов-водолазов в процессе интенсивных учебно-тренировочных сборов.

Методика

В исследованиях приняло участие 18 специалистов-водолазов (средний возраст – 30 ± 2,2 года), проходивших плановую профессиональную подготовку на специальной учебно-тренировочной базе г. Новороссийска. Программа обучения включала в себя серию водолазных спусков методом кратковременных погружений на малые и средние глубины с выполнением учебных трудовых операций и перемещением под водой в горизонтальном безопорном положении. Все испытуемые принимали участие в мероприятиях по общей и специальной физической подготовке, направленных на совершенствование профессионально важных эмоционально-волевых и физических качеств.

В целях соблюдения этических принципов, заложенных в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации, все обследуемые специалисты подписывали Информированное согласие на участие в экспериментах.

В соответствии с программой исследований все испытуемые в процессе рандомизации были разделены на 3 равные группы (n = 6): экспериментальную, контрольную, группу плацебо. Функциональное состояние водолазов оценивалось в ходе комплексного психофизиологического обследования, включавшего оценку показателей гемодинамики, регистрацию сердечного ритма с последующим анализом его вариабельности, проведение функциональной пробы Руфье – Диксона, оценку выносливости к статическому напряжению методом кистевой динамометрии и оценку субъективного состояния с помощью опросников САН.

Ингаляции терапевтической ксеноно-кислородной газовой смеси, а также умеренно гипероксигенированной воздушной смеси (плацебо) выполнялись представителям соответствующих групп через 3–5 ч после завершения тренировок, согласно циклограмме (рисунок). Комплексное обследование проводилось у всех респондентов утром, на 1-, 6- и 11-е сутки водолазных сборов.

В качестве ингалятора на основе ксенона использовался портативный ксеноновый терапевтический комплекс (КТК-01) производства ООО «Акела-Н». Процедура проводилась по схеме: частичная денитрогенизация чистым кислородом на протяжении 3 мин, ингаляция ксеноно-кислородной газовой смеси в соотношении 25 % Xe и 75 % O_2 в условиях закрытого контура в течение 6–7 мин, повторное дыхание чистым кислородом на протяжении 3 мин. Расход инертного газа на процедуру составил в среднем 3,5 ± 0,5 л.

В качестве плацебо-контроля использовалась умеренно гипероксигенированная воздушная смесь (50 % O_2), которая подавалась с помощью КТК-01 на протяжении 10 мин испытуемым соответствующей группы. Выбор данной газовой смеси в качестве плацебо был обусловлен отсутствием в научной литературе данных, позволяющих четко дифференцировать биологические эффекты ксенона от воздействия сопутствующих повышенных концентраций кислорода в дыхательной смеси.

Добровольцам контрольной группы никаких коррекционных мероприятий не проводилось.

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью встроенного программного модуля Microsoft Excel 2000 и методов непараметрической статистики.

Таблица 1

Динамика показателей функционального состояния водолазов в процессе учебно-тренировочных сборов

Группы	Измеряемые показатели	Номер обследования		
		I (фон)	II	III
Контроль	АДср (мм рт. ст.)	92,1 ± 2,9	93,2 ± 4,6	89,9 ± 2,2
	ИФИ (ед.)	2,31 ± 0,07	2,45 ± 0,1*	2,29 ± 0,05
	Индекс Руфье – Диксона	7,42 ± 0,67	7,38 ± 0,63	7,44 ± 0,59
	Статич. выносливость (с)	32,2 ± 2,4	30,5 ± 2,1	29,7 ± 2,0*
Плацебо	АДср (мм рт. ст.)	91,8 ± 3,6	89,7 ± 2,0	88,6 ± 2,1
	ИФИ (ед.)	2,26 ± 0,11	2,32 ± 0,06	2,21 ± 0,04
	Индекс Руфье – Диксона	7,36 ± 0,61	7,02 ± 0,34	6,4 ± 0,39*
	Статич. выносливость (сек)	31,8 ± 2,1	31,1 ± 1,9	30,6 ± 1,9
Экспери-ментальная	АДср (мм рт. ст.)	92,2 ± 3,1	91,9 ± 2,4	87,3 ± 2,7*
	ИФИ (ед.)	2,35 ± 0,18	2,40 ± 0,15	2,24 ± 0,09
	Индекс Руфье – Диксона	7,34 ± 0,49	5,61 ± 0,53**	5,16 ± 0,51**
	Статич. выносливость (с)	31,5 ± 2,6	31,3 ± 2,2	31,4 ± 2,1

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – статистически достоверные отличия по сравнению с фоновым измерением;
** – достоверные отличия между экспериментальной или плацебо группой и контрольной группой.

Таблица 2

Динамика показателей ВСР у специалистов-водолазов

Группы	Измеряемые показатели	Номер обследования		
		I (фон)	II	III
Контроль	SDNN (мс)	60,8 ± 4,7	52,4 ± 5,1*	45,6 ± 3,0*
	TP ($мс^2$)	4417 ± 721,5	4179 ± 611,4	3675 ± 663,3*
	LF/HF	3,01 ± 1,05	4,15 ± 1,01	4,41 ± 0,95*
	Mo (мс)	0,804 ± 0,058	0,759 ± 0,032	0,737 ± 0,021*
Плацебо	SDNN (мс)	62,0 ± 6,9	57,8 ± 9,8	58,6 ± 7,7**
	TP ($мс^2$)	4452 ± 681,1	4026 ± 990,6	4553 ± 938,1
	LF/HF	4,13 ± 0,86	6,48 ± 1,15	5,02 ± 0,72*
	Mo (мс)	0,806 ± 0,015	0,719 ± 0,058	0,751 ± 0,049
Экспери-ментальная	SDNN (мс)	60,5 ± 8,1	56,3 ± 9,1	55,2 ± 4,5**
	TP ($мс^2$)	4115 ± 757,2	3803 ± 802,8	3488 ± 513,4*
	LF/HF	4,46 ± 1,12	3,59 ± 0,58	3,01 ± 0,75**
	Mo (мс)	0,801 ± 0,018	0,772 ± 0,028	0,775 ± 0,025

Таблица 3

Динамика показателей субъективного состояния водолазов

Группы	Измеряемые показатели	Номер обследования		
		I (фон)	II	III
Контроль	Самочувствие (ед.)	5,42 ± 0,29	5,78 ± 0,18	5,20 ± 0,39
	Активность (ед.)	5,42 ± 0,25	5,24 ± 0,26	4,82 ± 0,41
	Настроение (ед.)	5,62 ± 0,46	5,92 ± 0,46	5,66 ± 0,31
Плацебо	Самочувствие (ед.)	5,46 ± 0,14	5,14 ± 0,41	4,88 ± 0,38
	Активность (ед.)	5,48 ± 0,17	4,96 ± 0,52	5,28 ± 0,31
	Настроение (ед.)	5,94 ± 0,24	5,58 ± 0,31	5,78 ± 0,19
Экспери-ментальная	Самочувствие (ед.)	5,38 ± 0,61	5,70 ± 0,58	6,05 ± 0,30*
	Активность (ед.)	5,05 ± 0,35	5,42 ± 0,46	5,72 ± 0,40*
	Настроение (ед.)	5,82 ± 0,38	6,22 ± 0,31	6,22 ± 0,16*

Примечание. * – достоверные отличия между опытной или плацебо группой и контрольной группой.

Результаты и обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали, что курсовое использование ингаляций терапевтических газовых смесей на основе ксенона оказывает существенное влияние на динамику уровня функционального состояния специалистов-водолазов (табл. 1).

Анализ показателей системной гемодинамики выявил тенденцию к увеличению среднего артериального давления (АДср) у испытуемых контрольной группы в среднем на 1,2 % при II обследовании. В дальнейшем данный показатель снижался и к концу сборов был в среднем на 2,4 % ниже фоновых значений. В группе плацебо, напротив, АДср имело устойчивую тенденцию к постепенному уменьшению. Так, к концу эксперимента данный показатель оказался ниже исходных значений в среднем на 3,5 %. Еще более существенным было снижение АДср у испытуемых экспериментальной группы. К моменту окончания сборов среднее артериальное давление у них было ниже фоновых значений в среднем на 5,3 % ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона).

Расчет индекса функциональных изменений (ИФИ) показал, что наибольших значений данный параметр у респондентов контрольной группы достигал к середине тренировочных сборов, возрастая в среднем на 6,1 % ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона). В группе плацебо-контроля, а также в экспериментальной группе наблюдалась аналогичная тенденция, однако увеличение ИФИ в середине сборов было менее выраженным (в среднем на 2,7 и 2,1 % соответственно), а при завершающем обследовании показатель был ниже исходных значений в среднем на 2,2 и 4,7 % соответственно.

При проведении функциональных проб было выявлено, что у добровольцев контрольной группы значения индекса Руфье – Диксона на протяжении всех сборов в среднем изменялись незначительно. В группе плацебо-контроля, индекс Руфье – Диксона имел отчетливую тенденцию к снижению, причем к моменту окончания сборов его значения были в среднем на 13,1 % ниже фоновых. В экспериментальной группе данная тенденция была еще более выражена. Так, при завершающем обследовании индекс Руфье – Диксона был в среднем на 29,7 % ниже исходных значений ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона). Сравнительный анализ обследуемых групп показал, что уже при II измерении значения индекса в экспериментальной группе были достоверно ниже, чем в контрольной группе, а также в группе плацебо. К моменту завершения эксперимента экспериментальная группа достоверно отличалась лишь от контрольной. Также от контрольной статистически значимо отличалась и группа плацебо-контроля ($p \leq 0,05$ по U-критерию Манна – Уитни).

Анализ показателя статической выносливости выявил тенденцию к прогрессивному снижению данного параметра у всех испытуемых по ходу проведения эксперимента. В контрольной группе данный показатель к моменту окончания сборов снижался в среднем на 7,8 % ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона). В группе плацебо-контроля снижение составило в среднем 3,8 %. В экспериментальной группе показатель статической выносливости в процессе учебно-тренировочных сборов изменялся незначительно.

При анализе вариабельности сердечного ритма (ВСР) было установлено, что в ходе проведения сборов средние значения среднеквадратичного отклонения интервалов R-R (SDNN) снижались во всех 3 обследованных группах (табл. 2). Так, в контрольной группе показатель SDNN к моменту завершения экспериментов был ниже фоновых значений в среднем на 24,9 % ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона). В группе плацебо-контроля показатель снижался в среднем на 5,5 %. В экспериментальной группе – на 8,8 %. Следует отметить, что к моменту завершения эксперимента средние значения SDNN в экспериментальной группе, а также в группе плацебо-контроля были достоверно выше, чем в контрольной ($p \leq 0,05$ по U-критерию Манна – Уитни).

В ходе работы были отмечены существенные отличия в динамике вагосимпатического индекса (LF/HF). В контрольной группе и группе плацебо отмечалось достоверное увеличение данного показателя к моменту окончания экспериментов (в среднем на 46,5 и 21,5 % соответственно). В экспериментальной группе, напротив, вагосимпатический индекс имел тенденцию к снижению, в конце сборов он был в среднем на 32,6 % ниже исходных величин, а также достоверно отличался, как от контрольной, так и от группы плацебо ($p \leq 0,05$ по U-критерию Манна – Уитни).

Обращает на себя внимание постепенное уменьшение моды кардиоинтервалов (Мо) у всех обследованных. Причем, если у обследуемых, которым никаких восстановительных процедур не проводилось, итоговые значения Мо были ниже фоновых величин в среднем на 8,3 % ($p \leq 0,05$ по Т-критерию Вилкоксона), то у добровольцев группы плацебо – в среднем на 6,8 %, а в экспериментальной группе – на 3,2 %.

Значительный интерес представляет анализ динамики субъективного состояния водолазов в процессе учебно-тренировочных сборов (табл. 3). Было выявлено, что у добровольцев контрольной группы к моменту завершения экспериментов наблюдалось снижение интегрального показателя самочувствия в среднем на 4,1 %, а активности – на 11,1 %. В группе плацебо-контроля также наблюдалось снижение всех 3 показателей субъективного состояния. Напротив, у водолазов, которым проводился

курс ингаляций специальных газовых смесей на основе ксенона, отмечалось улучшение самочувствия в среднем на 12,5 %, активности – на 13,3 %, настроения – на 6,9 %.

Следует отметить, что к моменту окончания экспериментов показатели субъективного состояния добровольцев экспериментальной группы были достоверно выше, чем у представителей контрольной ($p \leq 0,05$ по U-критерию Манна – Уитни).

В последние годы достигнут значительный прогресс в раскрытии механизмов биологического действия ксенона на организм человека. Как и многие общие ингаляционные анестетики, данный инертный газ способен взаимодействовать с различными рецепторами и ионными каналами, причем достигаемые этим эффекты зачастую дополняют друг друга [5]. Наибольшее количество работ посвящено способности ксенона ингибировать глутаматергическую передачу, значительно изменяя процессы нейрональной возбудимости и синаптической пластичности [5, 6]. Установлено, что ксенон является неконкурентным антагонистом NMDA-, AMPA- и каинатных рецепторов [5–8]. Наибольшая плотность этих ионотропных рецепторов отмечается в гиппокампе, коре больших полушарий, миндалине и стриатуме, т.е. именно в тех структурах, которые ответственны за память, обучение и ассоциированы с сенсорной функцией [7, 9]. В последние годы показана экспрессия NMDA-рецепторов в клетках островков Лангерганса поджелудочной железы, где они участвуют в регуляции секреции глюкагона и инсулина [10]. Глутаматные рецепторы выявлены в клетках мозгового вещества надпочечников, где они являются одним из факторов стимуляции выброса катехоламинов в условиях стрессорного воздействия [11]. В периферической нервной системе ионотропные глутаматные рецепторы участвуют в механизмах ноцицепции [12]. Все это позволяет рассматривать глутамат не только как нейротрансмиттер, но и в качестве своеобразного цитокина, способного воздействовать на клеточную активность в различных типах тканей [10, 12].

Таким образом, блокада ионотропных глутаматных рецепторов может оказывать существенное влияние на функциональное состояние человека, проявляясь как специфическим изменением состояния сознания, так и снижением активности симпатоадреналовой системы. Полученные в ходе работы результаты подтверждают это предположение.

Прежде всего, следует обратить внимание на динамику АДср, которое является производным сложного комплекса регуляторных и гемодинамических влияний, и в этом смысле может рассматриваться как маркер функционального состояния целостного организма [2, 4]. Как известно, АДср – это достаточно устойчивый показатель, отклонение которого у здоровых людей не превышает 10 %. В ходе исследования было отмечено снижение данного параметра во всех обследованных группах, что с учетом интенсивной профессиональной подготовки может рассматриваться как свидетельство высокого уровня функциональных резервов системы кровообращения у водолазов – участников исследования. Тем не менее в экспериментальной группе указанные изменения были выражены в наибольшей степени и носили статистически достоверный характер.

Выявленная динамика АДср у добровольцев экспериментальной и плацебо группы сочеталась с достаточно стабильными значениями статистических параметров вариабельности сердечного ритма: SDNN и Mo. В данных группах значения SDNN к моменту завершения учебно-тренировочных сборов были достоверно выше, чем в контрольной группе. Следует отметить, что SDNN является одним из наиболее удобных и информативных показателей ВСР, поскольку отражает все циклические компоненты, определяющие характер вариабельности ритма [13]. Низкие значения показателя SDNN, выявленные у водолазов контрольной группы, отражают недостаточный уровень вагусной активности, что приводит к доминированию симпатических механизмов регуляции сердечной деятельности. Это подтверждается и достоверным снижением моды кардиоинтервалов, которое было зафиксировано к моменту окончания эксперимента. Более высокие значения показателей SDNN и Mo у водолазов экспериментальной и плацебо групп свидетельствуют о более высокой активности парасимпатического звена нервной регуляции, что является одним из факторов индивидуальной устойчивости сердечно-сосудистой системы к воздействию неблагоприятных факторов профессиональной среды.

Значительный интерес представляет расчет вагосимпатического индекса. Его достоверное повышение у водолазов группы плацебо, в особенности у обследуемых контрольной группы, свидетельствует о признаках нарушения вагосимпатического баланса вегетативной нервной системы и тенденции к относительному преобладанию симпатического звена нервной регуляции.

У водолазов экспериментальной группы значения LF/HF к моменту завершения сборов были достоверно ниже, чем у добровольцев других групп, что может расцениваться как признак более адекватного функционирования регуляторных механизмов системы кровообращения, что согласуется с положением об адаптационно-трофическом защитном действии блуждающего нерва на сердечно-сосудистую систему.

Анализ динамики субъективной оценки собственного состояния показал, что у водолазов экспериментальной группы к моменту завершения сборов наблюдалось существенное увеличение

интегральных показателей самочувствия, активности и настроения, причем их абсолютные значения были достоверно выше, чем у представителей остальных 2 групп. На фоне нормализации эмоционального фона у водолазов, которым проводились ингаляции ксеноно-кислородных газовых смесей, у добровольцев контрольной и плацебо групп, напротив, было зафиксировано снижение интегральных показателей самочувствия и активности, что достаточно характерно при первоначальных признаках развивающегося утомления [1, 2].

Таким образом, ингаляции газовых смесей на основе ксенона приводили к значимому увеличению активности парасимпатического звена нервной регуляции, что сопровождалось снижением АДср и вагосимпатического индекса на фоне относительно стабильных значений статистических параметров ВСР. Другим значимым эффектом ингаляции инертного газа являлось улучшение субъективного состояния респондентов. Полученные результаты согласуются с имеющимися данными литературы, которые рассматривают данные эффекты как проявление блокады глутаматергической передачи в структурах головного мозга и периферических органах и тканях [3–5]. Данный процесс, по мнению ряда зарубежных авторов, не только приводит к индукции измененного состояния сознания в процессе процедуры с последующей нормализацией эмоционального фона, но и способствует снижению активности симпатоадреналовой системы за счет повышения активности парасимпатического звена нервной регуляции, снижения концентрации глюкокортикоидов и катехоламинов в сыворотке крови [3, 7, 8].

Еще одним механизмом биологического действия ксенона является его способность повышать активность индуцируемого гипоксией фактора 1α (HIF-1α). Хотя данный эффект сильно зависит от времени экспозиции инертного газа, его концентрации и степени сопутствующей гипоксии, тем не менее даже при кратковременных ингаляциях активация HIF-1α приводит к увеличению концентрации эритропоэтина, что, по всей видимости, является основной причиной повышения устойчивости организма к значительным физическим нагрузкам после ингаляций ксеноно-кислородных газовых смесей [14].

Статистически значимое уменьшение индекса Руфье – Диксона, которое было выявлено в ходе исследований у добровольцев экспериментальной группы, а также отсутствие отрицательной динамики показателя статической выносливости свидетельствует о положительном влиянии ингаляций ксеноно-кислородных газовых смесей на физическую работоспособность.

Выводы

1. Курсовое применение ингаляций специальных газовых смесей на основе ксенона позволяет поддерживать высокий уровень функционального состояния специалистов-водолазов в условиях интенсивной профессиональной подготовки.
2. Зафиксированная динамика показателей системы кровообращения и параметров вариабельности сердечного ритма свидетельствует о том, что ингаляции ксеноно-кислородных газовых смесей способствуют снижению чрезмерной активности симпатоадреналовой системы, повышая устойчивость организма к воздействию комплекса неблагоприятных факторов профессиональной среды.
3. Курсовое использование ингаляций специальных газовых смесей на основе ксенона способствует повышению устойчивости организма к интенсивным физическим нагрузкам.
4. Проведение ингаляций ксеноно-кислородных газовых смесей способствует улучшению субъективного состояния специалистов в условиях напряженной профессиональной деятельности и значительных физических и психоэмоциональных нагрузок.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ингаляции специальных газовых смесей на основе ксенона оказывают положительное влияние на уровень функционального состояния специалистов-водолазов, повышая их индивидуальную устойчивость к воздействию комплекса неблагоприятных факторов профессиональной среды. Полученные результаты позволяют рассматривать ингаляции ксеноно-кислородных газовых смесей как перспективное средство оперативной коррекции функционального состояния лиц, чья деятельность протекает в условиях значительных физических и психоэмоциональных нагрузок.

Список литературы

1. *Дмитрук А.И.* Медицина глубоководных погружений. СПб., 2004.

Dmitruk A.I. Medicine of deep diving. St. Petersburg, 2004.

2. *Новиков В.С., Горанчук В.В., Шустов Е.Б.* Физиология экстремальных состояний. СПб., 1998.

Novikov V.S., Goranchuk V.V., Shustov E.B. Physiology of extreme conditions. St. Petersburg, 1998.

3. *Буров Н.Е., Потапов В.Н.* Ксенон в медицине: Очерки по истории и применению медицинского ксенона. М., 2012.

Burov N.E., Potapov V.N. Xenon in medicine: Essays on the history and use of medical xenon. Moscow, 2012.

4. *Кальманов А.С., Бубеев Ю.А., Котровская Т.И.* Влияние курсового применения ингаляций ксеноно-кислородной газовой смеси на показатели функционального

состояния альпинистов // Лечебная физкультура и спортивная медицина. М., 2011. С. 27–35.

Kalmanov A.S., Bubeev Yu.A., Kotrovskaya T.I. The effect of a course of inhaled xenon-oxygen gas mixture to the parameters of the functional condition of the climbers // Lechebnaya fizkultura i sportivnaya meditsina. Moscow, 2011. P. 27–35.

5. *Bryan D.J., Elizabeth L.W.* Xenon as an anesthetic agent // AANA Journal. 2010. V. 78. № 5. P. 387–392.

6. *Booker R.D., Sum A.K.* Biophysical changes induced by xenon on phospholipid bilayers // Biochim. Biophys. Acta. 2013. V. 1828 (5). P. 1347–1356.

7. *Derwall M., Coburn M., Rex S., Hein M.* Xenon: recent developments and future perspectives // Minerva Anestesiol. 2009. V. 75. P. 37–45.

8. *Haseneder R., Kratzer S., Kochs E.* Xenon attenuates excitatory synaptic transmission in the rodent prefrontal cortex and spinal cord dorsal horn // Anesthesiol. 2009. V. 111. P. 1297–1307.

9. *Citri A., Malenka R.C.* Synaptic plasticity: multiple forms, functions, and mechanisms // Neuropsychopharmacol. 2008. V. 33. № 1. P. 1–24.

10. *Molnar E., Varadi A.* Identification of functional ionotropic glutamate receptor proteins in pancreatic beta-cells and in islets of Langerhans // FEBS Lett. 1995. V. 371. № 3. P. 253–257.

11. *Gonzalez M.P., Herrero M.T.* Effect of glutamate receptor agonists on catecholamine secretion in bovine chromaffin cells // Neuroendocrinol. 1998. V. 67. № 3. P. 181–189.

12. *Basbaum A.I., Bautista D.M., Scherrer G., Julius D.* Cellular and molecular mechanisms of pain // Cell. 2009. V. 139. № 2. P. 267–284.

13. *Баевский Р.М.* Анализ вариабельности сердечного ритма в космической медицине // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 1. С. 70–82.

Baevsky R.M. Heart rate variability in space medicine // Fiziologiya cheloveka. 2002. V. 28. № 1. P. 70–82.

14. *Jelkmann W.* Xenon misuse in sports – increase of hypoxia-inducible factors and erythropoietin, or nothing but «hot air»? // Deutsch. Z. Sportmed. 2014. V. 65. P. 267–271.

Поступила 18.11.2015

TEMPORARY CORRECTION OF THE FUNCTIONAL STATUS OF DIVERS BY INHALATION OF SPECIAL XENON-BASED GAS MIXTURES IN THE COURSE OF INSTRUCTIONAL AND TRAINING SESSIONS

Kalmanov A.S., Makarov E.V., Shishkin A.N., Pisarev A.A., Bubeev Yu.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 48–54

Purpose of the work was a placebo-controlled study of benefits from a course of therapeutic inhalation of a xenon-oxygen gas mixture provided to professional divers at intensive instructional and training sessions.

Participating 18 divers (aged 30 ± 2.2 yrs.) were distributed into 3 equal groups (n = 6): experimental, control and placebo. The experimental group inhaled a gas mixture of 25 % Xe and 75 % O_2; the placebo group inhaled a moderately hyperoxyginated air mixture. Functional status was assessed by analysis of hemodynamics, heart rate variability, subjective sensations, and functional tests data.

The course of xenon-oxygen inhalation was shown to decrease the sympathoadrenal activity, to normalize the subjective status and to strengthen body tolerance of physical loads.

Key words: xenon-based gas mixtures, functional status, divers, physical performance.

МЕТОДИКИ

УДК 159.9.072.5

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОНТЕНТ-АНАЛИЗУ ОБЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКИПАЖА

Гущин В.И., Юсупова А.К., Швед Д.М., Чекалина А.Г., Шуева Л.В., Кузнецова П.Г., Виноходова А.Г., Карпова О.И., Чернова Е.Г.

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

E-mail: d.shved84@gmail.com

В статье предлагается развитие дистанционного медико-психологического мониторинга космического экипажа на основе метода контент-анализа содержания общения с применением обоснованных правил кодирования к ограниченному воспроизводимому набору количественно измеряемых категорий. Описываются предлагаемые оценочные категории, которые могут использоваться для изучения обсуждения экипажем и Центром управления проблемных ситуаций, возникающих в ходе долговременного полета. Рассматривается возможность представления переговоров экипажа как вербального отражения стратегий совладания (копинга, по Р. Лазарусу) со стресс-условиями долговременного космического полета. В рамках трансактной теории общения Э. Берна анализируются психологические роли в контуре общения «экипаж – Центр управления полетами». Приводятся результаты валидизации описанного подхода.

Ключевые слова: общение экипажа, контент-анализ, трансактная теория общения, проблемные ситуации, Центр управления полетами, дистанционный психологический мониторинг.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 55–64.

Изучение общения космонавтов с Центром управления полетами (ЦУП) является штатной процедурой дистанционного медико-психологического мониторинга космических экипажей. Главной целью анализа является получение оперативных диагностических данных о психоневрологическом статусе членов экипажа под влиянием факторов космического полета (КП) [1]. В рамках развития этого направления группой психологов Института медико-биологических проблем РАН был разработан подход к изучению психоневрологического статуса космонавтов на основе контент-анализа их переговоров с ЦУП, проводимого экспертами Группы медицинского обеспечения Главной оперативной группы управления (ГМО ГОГУ) [1, 2]. Данный метод вошел в штатную практику группы психологического обеспечения полетов и является основой для написания соответствующих заключений в ходе КП. Основным преимуществом метода является проведение мониторинга психоневрологического статуса космонавтов непосредственно в ходе выполнения ими реальной деятельности (важным элементом которой являются переговоры с ЦУП) без использования дополнительного оборудования и затрат времени экипажа [3].

Количественный контент-анализ

Качественный подход к мониторингу поведения и состояния космонавтов имеет ограничения, связанные с его субъективностью, зависимостью от личности и опыта конкретного эксперта. Эта проблема тревожит не только отечественных специалистов. В настоящее время в Канаде [4] и США [5] для анализа речевого общения космонавтов все чаще используется подход, называемый содержательным (контент) анализом. Принципиальной его особенностью является приведение содержания общения, на основе обоснованных правил кодирования, к ограниченному воспроизводимому набору количественно измеряемых категорий, поддающихся компьютерной обработке [6, 7], который позволяет проводить количественный анализ текстов переговоров. Работы по контент-анализу ведутся в ИМБП с 1971 г. Модификация этого подхода с оригинальным набором изучаемых категорий разработана В.И. Гущиным, В.И. Мясниковым и А.К. Юсуповой [8]. Она использовалась специалистами ИМБП для анализа общения изолированных малых групп с ЦУП в модельных экспериментах с длительной изоляцией экипажей HUBES, ECOPSY, SFINCSS [9–11], а также в пилотном исследовании в ходе длительных КП [12, 13].

Безусловно, объективный анализ текста представляет собой отдельную философскую проблему. Однако новые возможности объективизации дистанционного психологического мониторинга, нивелирующие влияние субъективизма эксперта,

открывает автоматизация распознавания и подсчета анализируемых семантических категорий. Автоматизированный контент-анализ позволяет формализовать процесс анализа содержания общения, сведя его к компьютерной детекции в тексте семантических единиц, относящихся к заданным категориям, при помощи лингвистического программного обеспечения. Полученные с помощью компьютерного анализа текста количественные показатели легко могут быть подвергнуты обработке с применением методов математической статистики. При этом подходе методология анализа получает ключевое значение. Впервые компьютерный контент-анализ отчетов и радиограмм экипажа (посвященных описанию выполнения программы работ, состояния здоровья членов экипажей и логистики гермокамер) апробировался в рамках проводившегося в ИМБП модельного эксперимента «Марс-500». Полученные результаты показали высокую информативность данного подхода [14–16], позволили уточнить и проработать используемый категориальный аппарат.

Дальнейшее развитие количественный контент-анализ содержания переговоров космических экипажей получил в рамках космического эксперимента «Контент». Целью его проведения является дистанционный мониторинг психофизиологического состояния экипажа, внутри- и межгруппового (экипаж – ЦУП) взаимодействия на основе содержательного анализа коммуникаций в контуре «экипаж – ЦУП». При этом акцент в исследованиях сделан на сочетание привычного мониторинга психоневрологического статуса космонавтов и взаимодействия в экипаже с оценкой эффективности общения экипажей с Землей. Эта новая задача была обусловлена рядом негативных суждений в отношении коммуникации в ходе КП, высказанных в частных беседах американскими астронавтами и некоторыми российскими космонавтами [17].

Поведение космонавта – копинг-стратегии при дефиците ресурсов

Разрабатывая новые методологические подходы к контент-анализу общения космонавтов, мы отталкивались от классических работ Р. Лазаруса и его коллег, показавших, что стресс – это дискомфорт, испытываемый, когда отсутствует равновесие между индивидуальным восприятием запросов среды и ресурсов, доступных для взаимодействия с этими запросами. Согласно авторам работы [18], для того чтобы справиться с этими запросами, индивиды оценивают для себя величину потенциального стрессора, сопоставляя запросы среды с собственной оценкой ресурсов, которыми они владеют. В результате этого сопоставления вырабатываются копинг-стратегии (способы преодоления) – эмоциональные, мотивационно-волевые, когнитивные и поведенческие конструкты, которые человек актуализирует для адаптации к трудовым ситуациям, требующим проявления психологической устойчивости [19]. В рамках популярного ресурсного подхода к анализу стратегий преодоления стрессогенных ситуаций [20, 21] рассматривают широкий спектр используемых человеком ресурсов, как средовых (доступность инструментальной, моральной и эмоциональной помощи со стороны социальной среды), так и психофизиологических (навыки и способности индивида, состояние его здоровья).

В космической психологии пионером изучения копинга стал П. Зюдфелд (P. Suedfeld) [22, 23], считающий, что ситуация КП с ее лимитированными малодоступными инструментальными ресурсами, риском для жизни и здоровья человека, высокой социальной ответственностью выполняемой деятельности непосредственно относится к вызывающим чрезмерные или превышающие ресурсы человека требования. Отечественные космические психофизиологи [1, 24–27] особо выделяли среди космических стрессоров постоянно присутствующий в длительных полетах дефицит информационных ресурсов (сенсорная депривация и монотония) и «вынужденный характер» общения с ограниченным контингентом лиц.

В настоящее время в исследованиях, посвященных изучению адаптационных возможностей личности, достаточно часто встречается понятие «личностный адаптационный потенциал» [28, 29]. Некоторые авторы отождествляют «адаптационный потенциал» с понятием «адаптивность», т.е. свойством, выражающим возможность личности к психической адаптации и определяющим адекватную регуляцию функционального состояния организма в разнообразных условиях жизни и деятельности. Авторы работы [29] рассматривают адаптационный потенциал как возможности личности к продуктивному прохождению адаптационного процесса, как способность личности (под воздействием внутренних и внешних факторов) к структурным и уровневым изменениям своих качеств и свойств, повышающим ее организованность и устойчивость. Они выделяют следующие его компоненты: энергетический, когнитивный, инструментальный, креативностный, мотивационный и коммуникативный.

Исходя из этого, определяющим для эффективного преодоления трудностей взаимодействия с вызывающей стресс космической средой являются личностные ресурсы космонавта (навыки, способности, личностные качества, например, жизнестойкость), по мнению авторов работы [30], а также наличие информационной, моральной и эмоциональной поддержки экипажа со стороны ЦУП. Поэтому методы активизации личностного ресурса членов экипажа, наряду с использованием

общения с Землей для реконструкции привычной системы информационного взаимодействия с социумом, и послужили фундаментом для формирования специализированной системы психологической поддержки в ходе КП [31]. Это подкрепляет данные салютогенной (salutogenic concept) модели здоровья А. Антоновски [32], в которой копинг и социальная поддержка являются центральными конструктами, определяющими понятие резистентности к стрессу, а также результаты исследования стресс-резистентности [33].

Обсуждение проблемных ситуаций – основной источник диагностической информации

Как показывает опыт психоневрологического мониторинга космических экипажей, для решения задач психологического мониторинга наибольшее значение имеет изучение обсуждения экипажем с ЦУП проблемных ситуаций, периодически возникающих на борту в ходе длительных КП. Эта точка зрения была сформулирована уже в 80-х годах XX в. [1] и не теряет актуальности в связи с сохранением порядка речевого взаимодействия между космонавтами и Землей. Анализ переговоров в этих случаях показывает: а) причину возникновения психофизиологической напряженности у космонавтов (тип дефицита ресурсов: инструментальных, информационных, психологических); б) особенности взаимодействия в контуре «ЦУП – экипаж»; в) способы преодоления (копинг-стратегии) в проблемных ситуациях; г) их сравнительную эффективность для снижения уровня индивидуального стресса и решения проблем. Поэтому анализ содержания (контента) проблемных ситуаций мы считаем ключевым и наиболее значимым для решения задач исследования особенностей коммуникации экипажа с ЦУП. Используя принятую в современной психологии классификацию ошибочных действий [34] и исключив из рассмотрения как нерелевантные для данной профессиональной группы ошибки, связанные с недостатком мотивации и навыков, мы условно разделили все обсуждаемые экипажем проблемы на: 1) нехватку инструментального ресурса, который невозможно немедленно восполнить ввиду частичной автономности орбитального полета (что-то отсутствует, закончилось, перестало функционировать); 2) проблемы, связанные с когнитивными ошибками (ошибки восприятия, внимания, памяти); 3) ошибки в принятии решений (выбор наиболее доступного решения, решение по аналогии, консерватизм, радикализм и пр.); 4) проблемы коммуникации (межгруппового общения).

Несомненный интерес представляло изучение причин ошибок, среди которых, пользуясь принятой в современной психологии классификацией, следует особо выделять ошибки, связанные с нарушениями функционального состояния космонавтов, несоблюдением требований к режиму труда и отдыха, нештатными ситуациями (аварии, поломки) и неэффективным стилем общения операторов ЦУП и специалистов Земли.

Усилия

При анализе общения как вида деятельности экипажа исходили из того, что большая часть работ является запланированной и регламентирована радиограммами ЦУП. В то же время любые не оговоренные заранее работы не входят в исходное соглашение и потому требуют дополнительных волевых и физических усилий и соответственно копинга. Кроме того, дополнительные усилия могут быть связаны с пожеланием срочно (вне установленного графика) выполнить работу (работы), причем одновременно с другими запланированными. При этом формы реагирования как со стороны экипажа (его попросили сделать что-то дополнительно), так и со стороны ЦУП в подавляющем большинстве случаев включают в себя активное воздействие на стрессор: планирование, позитивная переоценка ситуации и самоконтроль для подавления нежелательных негативных эмоций. Для нас с точки зрения психологического мониторинга представляли наибольший интерес другие, достаточно редкие ситуации дефицита личностных ресурсов. По нашему мнению, о развившемся дефиците личностных ресурсов (прежде всего физическом и психическом утомлении) могло косвенно свидетельствовать использование стратегий избегания, конфронтации и откладывания ответственности.

Проблема и хронологический подход

При анализе общения в проблемной ситуации применялся хронологический подход, т.е. обсуждение проблемы рассматривалось в динамике, от момента ее возникновения до ее разрешения. Соответственно рассматривалось содержание общения от момента детекции ошибки (кто обнаружил?) через стадию принятия ответственности за проблемную ситуацию (кто виноват, кто принял ответственность?) до момента собственно разрешения проблемной ситуации и связанных с этим усилий (рис. 1). Все высказывания в ходе переговоров интерпретировались с позиций используемых стратегий преодоления стресса (тип копинга). Мы, как и давно использующая копинг-подход к анализу общения астронавтов группа П. Зюдфелда (P. Suedfeld) [4], подразделяем копинг-стратегии [18] на проблемно-ориентированные, направленные либо на разрешение проблемы, либо дистанцирование субъекта от стрессора (проблемы), а также на эмоционально-ориентированные, направленные

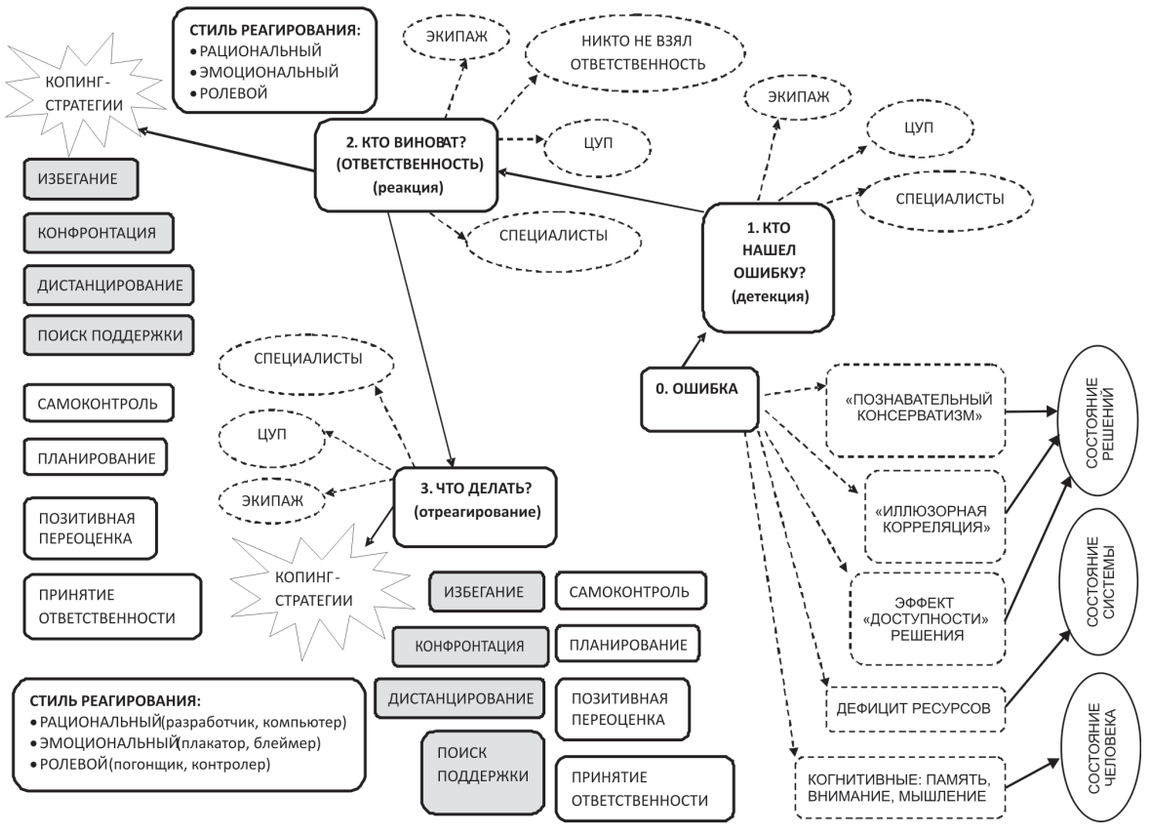


Рис. 1. Копинг-стратегии при возникновении проблемных ситуаций на космической станции

на то, чтобы сделать проблему менее психологически болезненной, более переносимой. К 1-й группе относятся стратегии: а) планового разрешения проблем; б) поиска поддержки; в) подчинения (выполнения указаний), а также расцениваемые нами как негативные: г) ухода от проблем или избегания; д) конфронтации (дискуссии, несогласия, отказа от решения). К эмоционально-ориентированным стратегиям относятся позитивные стратегии: е) самоконтроля; ж) принятия ответственности; з) позитивной переоценки, а также негативные стратегии: и) эмоционального дистанцирования и к) игнорирования серьезности проблемы.

Задачей анализирующего общение эксперта (и впоследствии программного обеспечения) является выделение семантических признаков использования описанных копинг-стратегий. Следует подчеркнуть, что описанный хронологический подход используется при анализе сообщений всех участников межгрупповой коммуникации: экипажа, группы операторов ЦУП и группы специалистов Земли. Выделение в общающихся с космонавтами на Земле подгрупп «операторы ЦУП» и «специалисты» обусловлено различием функций этих коммуникантов. При их описании мы использовали классификацию групп Р. Бэйлза (R. Bales) [35, 36], выявившего 2 типа функций, необходимых для успешного взаимодействия групп в рамках единого контура: функции собственно решения задач (экипаж, позиции «инициатор» и «разработчик», по Бэйлзу) и функцию оказания поддержки (Земля). Группа ЦУП, исходя из возложенных на нее руководством полета обязанностей, управляет процессами на Международной космической станции (МКС) («вдохновитель» и «погонщик»), сфокусирована на распределении («диспетчер» и «координатор») информационных потоков в контуре «борт – Земля» (отправка и получение радиограмм и устных сообщений, распространение их содержания между космонавтами, специалистами и руководством полета, коммутация, при необходимости, специалиста с членом экипажа). Кроме того, она также осуществляет нормирование и контроль исполнения (квитанции) их содержания («нормировщик» и «оценщик»). Группа специалистов осуществляет непосредственную информационную поддержку выполнения операций полетной программы. При этом обе группы, будучи вовлечены в общение, выполняют, по Б.Ф. Ломову [37] (1981), не только собственно обмен информацией (информационно-коммуникативная функция), но и делятся своими эмоциями (аффективно-коммуникативная функция), а также исполняют в отношении

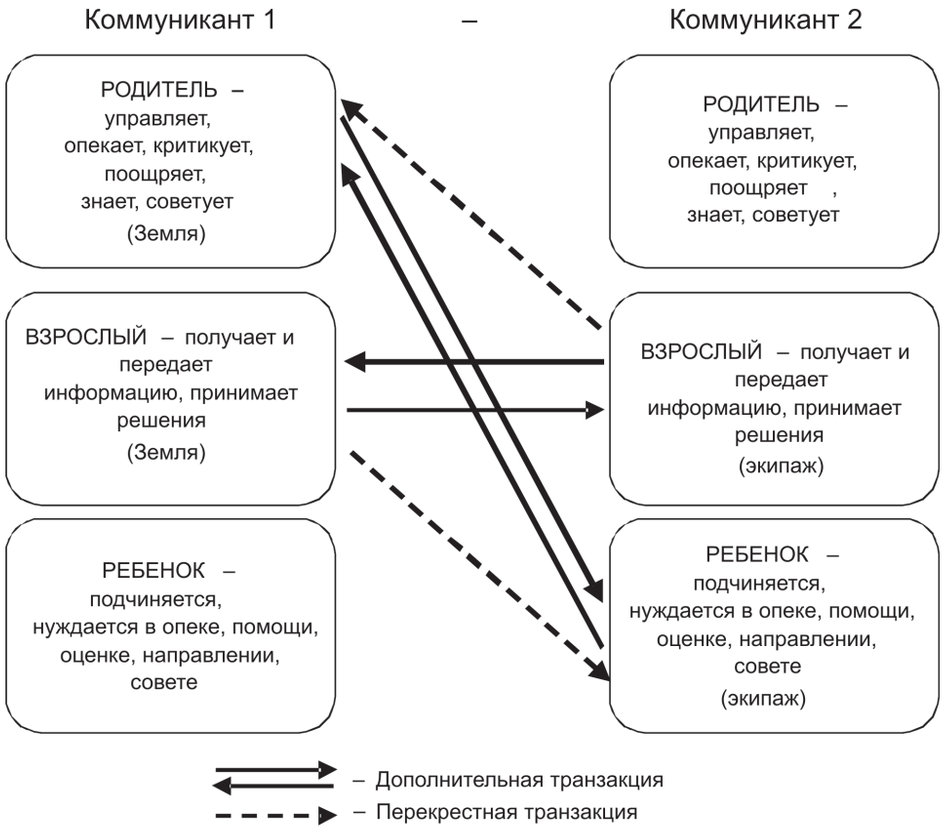


Рис. 2. Представление коммуникации в контуре «экипаж – Земля» с точки зрения теории Э. Берна

экипажа определенную социальную роль (регуляционно-коммуникативная функция).

Ролевой подход к структуре общения «экипаж – ЦУП» и факторы ДКП

При анализе общения как проявления социальной регуляции исходили из положений классической, давно зарекомендовавшей себя в психотерапевтической и клинической практике психодинамической теории психотерапии об эго-состояниях личности (состояниях «Я») и транзактной теории общения Э. Берна [38]. Использование этого подхода к анализу общения изолированной малой группы представляется нам актуальным, поскольку автор указывал, что ценность общения как ключевой человеческой потребности особенно возрастает при росте сенсорной депривации (дефиците новых впечатлений). Ситуация длительного космического полета, с обостренными по сравнению с жизнью на Земле сенсорной депривацией и монотонией, узким, навязанным целями полета кругом коммуникантов, делает общение космического экипажа не только видом деятельности, но, по Берну, отчасти и ритуалом, и развлечением, и игрой.

Берн выделяет следующие 3 эго-состояния человека, которые обусловливают типичные способы поведения и высказываний: Родитель, Взрослый, Ребенок (табл. 1). Каждое из состояний «Я» выполняет определенные функции и вследствие этого является жизненно необходимым. Эго-состояние Родитель, основанное на правилах поведения, нормах, позволяет индивиду успешно ориентироваться в стандартных ситуациях, «запускает» полезные, проверенные стереотипы поведения, освобождая сознание от загруженности простыми, обыденными задачами. Кроме того, данное состояние обеспечивает с большой вероятностью успеха поведение в ситуациях дефицита времени на размышления, анализ, поочередное рассмотрение возможностей поведения. Эго-состояние Родитель подразделяется на заботливый родитель (опека) и критический родитель, которое обнаруживает себя в таких проявлениях, как контроль, запреты и др. По нашему мнению, выделение в работе группы операторов ЦУП и группы специалистов в качестве ключевых – контрольных и информационно-консультативных – функций позволяет описывать их общение с точки зрения доминирования в ней роли Родителя. Очевидно, что наиболее часто этот Родитель заботлив, отвечая на вопросы экипажа, снабжая его, по Лазарусу, информационными (советами и рекомендациями), инструментальными (допоставки) и моральными (психологическая поддержка) ресурсами.

При этом группа операторов-диспетчеров чаще и активнее, чем группа специалистов, реализует как функции контроля и критики, так и функции заботы, психологической поддержки. В общении группы специалистов более выражена родительская (учительская) функция донесения, передачи знаний.

В то же время в общении экипажа превалирует позиция Взрослого. Это состояние «Я» воспринимает и перерабатывает логическую составляющую информации, принимает решения преимущественно обдуманно и без эмоций, проверяя их реальность. Важно отметить, что эго-состояние Взрослый, в отличие от эго-состояния Родитель, способствует адаптации не в стандартных, однозначных ситуациях, а в уникальных, требующих размышлений, дающих свободу выбора и вместе с этим необходимость осознания последствий и ответственного принятия решений. Действительно, в нештатных, аварийных ситуациях в условиях дефицита времени только экипаж обладает, с одной стороны, всей полнотой информации о происходящем, а с другой – должен самостоятельно и творчески решать (и решает!) возникающие задачи.

Эго-состояние Ребенок присутствует в общении экипаж – ЦУП в минимальной степени. Это обусловлено тем, что на обоих концах контура присутствуют зрелые личности, отлично подготовленные профессионалы. Данное состояние «отвечает» за творчество, оригинальность, разрядку напряжения, получение приятных, иногда «острых», необходимых в определенной степени для нормальной жизнедеятельности впечатлений. Все эти компоненты малосовместимы с суровыми буднями, напряженной, четко регламентированной работой с риском для жизни. Тем не менее полностью исключить этот компонент из анализа будет неправильно, каждый, даже вполне сформировавшийся человек до некоторой степени сохраняет в душе ребенка. Кроме того, Берн указывает, что каждое из состояний «Я» выполняет определенные функции и вследствие этого является жизненно необходимым. Эго-состояние Ребенок проявляет себя, когда человек не чувствует достаточно сил для самостоятельного решения проблем: не способен преодолеть трудности или/и противостоять давлению другого человека. Данное состояние подразделяется на естественное (спонтанные эмоциональные реакции типа радости, печали и т.д.), приспосабливающееся, зависимое (послушный, колеблющийся, виноватый и т.п.), возражающее, обвиняющее. Как показывает анализ коммуникаций экипажа, эта роль порой навязывается управляющим полетом центром (порой члены экипажа просто вынуждены играть эту роль под давлением управляющего полетом ЦУП).

При анализе высказываний (транзакций) Э. Берн предлагает исходить из того, что при общении противостоят друг другу все 3 выделенных компонента личности каждого из общающихся людей (рис. 2). При этом непосредственный акт межличностного взаимодействия (транзакция) может быть адресован любому из состояний партнера или одновременно нескольким состояниям (см. ниже). Ответ может осуществляться в параллельном направлении («дополнительная транзакция»). Очевидно, что подавляющее большинство контактов в контуре «экипаж – ЦУП» протекает именно в этом, профессиональном режиме, когда общение коммуникантов происходит в эго-состояниях Взрослые с эффективным обменом информацией. Например, в ответ на заданный Землей вопрос следует ответ о состоянии дел на орбите или же предложение экипажа о смене порядка выполнений заданий встречает понимание и поддержку операторов ЦУП. Как же возникают те проблемные ситуации, которые вызывали недовольство космонавтов?

Ключевое противоречие ролевого общения в контуре «борт – Земля»

По Берну, в каждой из ролей общающихся, кроме роли Взрослого, исходно, генетически заложено противоречие. Для роли контролирующего Родителя (операторы ЦУП) оно проявляется, как и в земной ипостаси этой роли, в том, что Родитель зачастую не имеет полного представления о реальной ситуации опекаемого им Ребенка (гуляет где-то) и руководствуется в своих оценках устарелыми представлениями (личным, теряющим актуальность опытом, предубеждениями). Отсюда, с одной стороны, неполное доверие к сообщаемой Ребенком информации, а с другой – стремление компенсаторно еще больше повысить контроль за подопечным. В случае группы ЦУП такая ситуация обусловлена дистанционным характером мониторинга (контролируемый объект находится в недосягаемости), необходимость руководствоваться в своих выводах не только объективной телеметрией станции, но и субъективными сообщениями космонавтов.

Как показывает опыт анализа коммуникаций в модельных экспериментах [10, 12], сколь бы ни были подробны сообщения экипажа, они не позволяют ЦУП иметь ту же информацию, как если бы его сотрудники лично присутствовали внутри гермообъема. Поэтому, стремясь повысить свою осведомленность, необходимую для принятия важных решений и консультаций, ЦУП вынужден периодически «перегибать палку» с требованиями отчета, особенно в случае возникновения реальных технических проблем. Проблема коммуникаций группы специалистов близка к описанной и дополнена высокой специализацией контакта с экипажем (специалист вызывается для решения конкретной технической проблемы или сопровождения проведения эксперимента), его ориентированностью лишь на

Таблица 1

Состояния «Я» и типичные способы их высказывания членами космических экипажей

Состояние «Я»		Типичные способы высказывания
Родитель	Заботливый Родитель	Утешает, исправляет, помогает: «Это мы сделаем», «Не стоит беспокоиться», «Мы все здесь вам поможем»
	Критический Родитель	Контролирует, критикует, командует: «Мы хотели бы знать действительное расположение объектов», «Как, вы еще этого не измерили?», «Мы настоятельно рекомендуем сделать именно так»
Взрослый		Собирает и дает информацию, оценивает вероятность, принимает решения: «Я уже все починил», «Мы инициативно все уже сделали», «Мы знаем, как с этим справиться»
Ребенок	Спонтанный, эмоциональный Ребенок	Естественное, импульсивное, хитрое, эгоцентричное поведение: «На все это просто не хватает времени!», «Это повторяется из полета в полет!»
	Приспосабливающийся Ребенок	Зависимое, уступчивое поведение: «Мы пытались, но это придется отменить», «Я не понимаю, как это можно реализовать»
	Бунтующий, обвиняющий Ребенок	Протестующее, бросающее вызов поведение: «Я это делать не буду, это бессмысленно!», «Вы украли мое личное время!»

определенный набор операций космонавта. При этом эти операции абсолютизируются, их значение преувеличивается, они вырываются из контекста общей ситуации жизни в космосе. Иными словами, специалист еще менее оператора ЦУП понимает весь спектр условий, в которых вынужден выполнять операции космонавт, и порой дает свои рекомендации без их учета.

Проявляя в ходе длительной экспедиции свою позицию контролирующего Родителя, ЦУП автоматически понижает в общении роль экипажа от адаптировавшегося на станции и способного во всем самостоятельно разобраться Взрослого – до чересчур самостоятельного, не вполне компетентного Ребенка, по тем или иным причинам не доводящего всей необходимой информации и оттого требующего постоянного присмотра. В ходе такого усиленного присмотра Ребенок вырывается из круга своего естественного существования, фактически принуждается к общению, порой превращаемому в допрос.

В этом случае, по Э. Берну, возникает так называемая перекрестная транзакция, когда под внешним слоем обмена информацией между уровнями (по типу «дополнительной») скрывается противостояние сразу с несколькими состояниями. Например, Взрослый одного из партнеров обращается к Взрослому другого с внешне рациональным предложением, в котором на самом деле заложен излишне большой потенциал родительского контроля и опеки, а тот в ответ избирает «детскую» реакцию, адресуемую Родителю партнера. Основная проблема перекрестных транзакций, по Э. Берну, заключается в том, выполнение своей настоящей роли в таком контакте каждой из сторон маскируется ролью Взрослого, начинается так называемая «игра» с целью поиска виноватого. Нарушения общения связаны либо с подавлением одного из них, либо с проявлением в тех ситуациях, которые оно не должно контролировать. Возникает дисгармония отношений, нарушается взаимопонимание, возрастает вероятность конфликта. Следует особенно подчеркнуть, что эти позиции объективно обусловлены ситуациями взаимодействия в контуре «борт – Земля», а не личностными особенностями участников общения.

Валидизация методики

Исходя из описанной методологической парадигмы, было проведено пилотажное исследование с участием 4 экспертов.

В пилотном исследовании принимали участие 4 эксперта (А.Ю., Д.Ш., Л.Ш., П.К.). Они проводили оценку месячного массива данных с переговорами между экипажем МКС и ЦУП по 19 показателям: поддержка, повтор сказанного, повторные запросы, повтор в связи с игнорированием, инициатива, требование/просьба, подчинение, неподчинение (копинг), юмор, время, сон, конфронтация, избегание, откладывание ответственности, поиск поддержки, самоконтроль, планирование, позитивная переоценка, принятие ответственности.

Для оценки согласованности мнений экспертов использовался метод ранговой корреляции Спирмена

$$rs = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

где d^2 – разность групповых и индивидуальных рангов; n – количество ранжируемых показателей.

Мнения каждого эксперта по отдельности по 19 показателям оценивания по очереди сравнивались с мнением группы (3 эксперта). Для вычисления группового сырого балла по каждому показателю использовался метод графической медианы.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа согласованности мнений экспертов

Эксперты	Статистические показатели	Эксперты			
		А.Ю.	П.К.	Л.Ш.	Д.Ш.
А.Ю.	Коэффициент корреляции	1	0,704*	0,886*	0,821*
	Знч. (2-сторон.)	.	0,001	0	0
	N	19	19	19	19
П.К.	Коэффициент корреляции	0,704*	1	0,716*	0,749*
	Знч. (2-сторон.)	0,001	.	0,001	0
	N	19	19	19	19
Л.Ш.	Коэффициент корреляции	0,886*	0,716*	1	0,805*
	Знч. (2-сторон.)	0	0,001	.	0
	N	19	19	19	19
Д.Ш.	Коэффициент корреляции	0,821*	0,749*	0,805*	1
	Знч. (2-сторон.)	0	0	0	.
	N	19	19	19	19

Примечание. * – корреляция значима на уровне 0,01 (2-сторонняя).

Согласованность оценивания эксперта А.Ю. и группы была высокой и составляла 0,8780. Полностью совпадающих мнений эксперта А.Ю. и группы не было выявлено. Однако имели место близкие оценки (разница в диапазоне от 0,5 до 1 в рангах) по показателям «повтор сказанного», «юмор», «сон», «конфронтация», «самоконтроль», «позитивная переоценка», «принятие ответственности».

Согласованность оценивания эксперта Д.Ш. и группы составляла 0,8964. Было выявлено полностью совпадающее мнение эксперта Д.Ш. и группы по показателю «планирование». Также отмечали близкие оценки (разница в диапазоне от 0,5 до 1 в рангах) по показателям «повтор сказанного», «принятие ответственности».

Согласованность оценивания эксперта Л.Ш. и группы составляла 0,8767. Были определены полностью совпадающие мнения эксперта Л.Ш. и группы по показателям «неподчинение (копинг)», «время». Также имелись близкие оценки (разница в диапазоне от 0,5 до 1 в рангах) по показателям «повтор сказанного», «сон», «конфронтация», «избегание», «позитивная переоценка».

Согласованность оценивания эксперта П.К. и группы составляла 0,7627. Не было выявлено полностью совпадающих мнений эксперта П.К. и группы. Однако отмечали близкие оценки (разница в диапазоне от 0,5 до 1 в рангах) по показателям «инициатива», «планирование».

Проведенный корреляционный анализ между оценками экспертов, результаты которого представлены в табл. 2, показал, что наиболее согласованные между собой оценки (rs выше 0,8) дали эксперты А.Ю. и Л.Ш (rs = 0,886), А.Ю. и Д.Ш. (rs = 0,0821), Л.Ш. и Д.Ш. (rs = 0,805).

Выводы

1. Разработанная методология контент-анализа радиопереговоров космического экипажа с ЦУП должна существенно повысить точность и дифференцированность дистанционного психологического мониторинга состояния членов экипажа, групповой динамики в экипаже и эффективности взаимодействия в контуре «экипаж – ЦУП». На ее основе предполагается выработать универсальную кодировочную инструкцию для экспертов-психоневрологов и в дальнейшем на ее основе автоматизировать процесс анализа радиопереговоров экипажа.

2. Проводимое впервые на борту МКС изучение проблем взаимодействия в контуре «борт – Земля» позволит разработать практические рекомендации, которые дадут возможность облегчить коммуникацию, повысить эффективность обмена информацией и усилить одну из важнейших функций общения – психологическую поддержку человека, находящегося в экстремальных условиях обитания.

Работа выполнена в рамках договора между ГНЦ РФ – ИМБП РАН и РКК «Энергия».

Список литературы

1. Дистанционное наблюдение и экспертная оценка: общение и коммуникация в задачах медицинского контроля / В.И. Мясников, ред. М., 1982.

Remote monitoring and expert assessment: communication in tasks of medical control / V.I. Myasnikov, ed. Moscow, 1982.

2. *Береговой Г.Т., Богдашевский Р.Б., Григоренко В.Н., Почкаев И.Н.* Космическая академия. М., 1993.

Beregovoy G.T., Bogdashevskiy R.B., Grigorenko V.N., Pochkaev I.N. Space academy. Moscow, 1993.

3. *Мясников В.И., Шапошников Е.А., Замалетдинов И.С.* Полетный психоневрологический контроль // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 322–333.

Myasnikov V.I., Shaposhnikov E.A., Zamaletdinov I.S. Inflight psychoneurological control // Orbital station «Mir». M., 2001. V. 1. P. 322–333.

4. *Suedfeld P.* Space memoir: value hierarchies before and after mission – a pilot study // Acta Astronautica. 2006. V. 58. P. 583–586.

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

6. *Berelson B.* Content Analysis in Communication Research. N.Y., 1971.

7. *Krippendorf K.* Content analysis: an introduction to its methodology. Newbury Park, CA, 1980.

8. *Мясников В.И., Гущин В.И., Юсупова А.К.* Предварительные результаты психологического анализа коммуникаций экипажей Международной космической станции // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. Сер. Психология. 2005. № 1 (45). С. 112–118.

Myasnikov V.I., Gushchin V.I., Yusupova A.K. Preliminary results of ISS space crews communication psychological analysis // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Ser. Psychology. 2005. № 1 (45). P. 112–118.

9. *Гущин В.И., Заприса Н.С., Пустынникова Ю.М. и др.* Особенности коммуникации национального и международного экипажей в условиях длительной изоляции // Модельный эксперимент с изоляцией в гермообъекте: проблемы и достижения. М., 2001. С. 100–114.

Gushchin V.I, Zaprisa N.S., Pustynnikova Yu.M. et al. Peculiarities of the national and international crew communication under prolonged isolation // Simulation of extended isolation: problems and advances. Moscow, 2001. P. 100–114

10. *Гущин В.И.* Проблемы дистанционного общения изолированных малых групп // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 5. С. 39–46.

Gushchin V.I. Problems of remote communication of isolated small groups // Fiziologiya cheloveka. 2003. V. 29. № 5. P. 39–46.

11. *Gushchin V.I., Efimov V.A., Kolinitchenko T.B., Kanas N. et al.* Content analysis of the crew communication dynamics with external communicants under prolonged isolation // Aviat., Space and Environ. Med. 1997. V. 68. № 12. P. 1093–1098.

12. *Юсупова А.К., Гущин В.И., Попова И.И.* Общение в контуре Центр управления полетами – космический экипаж: социально-психологические аспекты // Авиакосм. и экол. мед. 2006. Т. 40. № 2. С. 16–19.

Yusupova A.K., Gushichn V.I., Popova I.I. Communication in the crew – Mission Control contour: socio-psychological aspects // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2006. V. 40. № 2. P. 16–19.

13. *Kanas N., Yusupova A., Gushchin V. et al.* Problems and possibilities of astronauts – ground communication content analysis validity check // Acta Astronautica. 2008. V. 63. P. 822–827.

14. *Швед Д.М., Гущин В.И., Виноходова А.Г. и др.* Новый метод дистанционной оценки психофизиологического состояния спецконтингента // Технологии живых систем. 2010. Т. 7. № 2. С. 25–31.

Shved D.M., Gushchin V.I., Vinokhodova A.G. et al. New method for the distant assessment of psychophysiological state of the stuff // Tekhnologii zhivykh system. 2010. T. 7. № 2. P. 25–31.

15. *Швед Д.М., Гущин В.И., Виноходова А.Г. и др.* Психофизиологическая адаптация и коммуникативное поведение человека-оператора в условиях 105-суточной изоляции // Авиакосм. и экол. мед. 2011. Т. 45. № 1. С. 34–39.

Shved D.M., Gushchin V.I., Vinokhodova A.G. et al. Psychophysiological adaptation and communicative behavior of human operator under 105-days isolation // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2011. V. 45. № 1. P. 34–39.

16. *Швед Д.М., Гущин В.И., Эман Б., Балаж Л.* Особенности влияния задержки связи на коммуникации экипажа и центра управления в эксперименте с 520-суточной изоляцией // Там же. 2013. Т. 47. № 3. С. 19–23.

Shved D.M., Gushchin V.I., Ehman B., Balazs L. Peculiarities of the communication delay impact on the crew communication with Mission Control in the experiment with 520-days isolation // Ibid. 2013. V. 47. № 3. P. 19–23.

17. *Kelly A.D., Kanas N.* Crewmember communication in space: a survey of astronauts and cosmonauts // Aviat., Space and Environ. Med. 1992. V. 63. P. 721–726.

18. *Lazarus R., Folkman S.* Stress, appraisal and coping. Springer, 1984.

19. *Водопьянова Н.Е.* Психодиагностика стресса. СПб., 2009.

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

20. *Hobfoll S.E.* Conservation of resources: a new attempt at conceptualizing stress // Am. Psychologist. 1989. V. 44. P. 513–524.

21. *Муздыбаев К.* Стратегия совладания с жизненными трудностями. Теоретический анализ // Журнал социологии и социальной антропологии. 1998. Т. 1. № 2. С. 100–109.

Muzdybaev K. Strategy of coping with life difficulties. Theoretical analysis // Zhurnal sotsiologii i sotsialnoy antropologii. 1998. V. 1. № 2. P. 100–109.

22. *Suedfeld P., Brcic J., Johnson Ph.J., Gushchin V.* Personal growth following long-duration spaceflight // Acta Astronautica. 2012. V. 79. P.118–123.

23. *Suedfeld P., Brcic E., Johnson Ph., Gushin V*. Coping strategies during and after spaceflight: data from retired cosmonauts // Ibid. 2015. V. 110. P. 43–49.

24. *Новиков М.А.* Психофизиологические и экопсихологические аспекты межличностного взаимодействия в автономных условиях // Проблемы общения в психологии / Б.Ф. Ломов, ред. М., 1981. С. 178–217.

Novikov M.A. Psycho-physiological and eco-psychological aspects of interpersonal interaction under autonomous conditions // Problem of communication in psychology / B.F. Lomov, ed. Moscow, 1981. P. 178–217.

25. *Следь А.Д., Козеренко О.П., Гущин В.И., Пустынникова Ю.М*. Проблемы психологического взаимодействия в международных экипажах // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 378–390.

Sled A.D., Kozerenko O.P., Gushchin V.I, Pustynnikova Yu.M. Problem of psychological interaction in international crews // Orbital station «Mir». M., 2001. V.1. P. 378–390.

26. *Бодров В.А.* Психологический стресс: к проблеме его преодоления // Проблемы психологии и эргономики. 2001. № 4. С. 28–33.

Bodrov V.A. Psychological stress: to the problem of its coping // Problemy psikhologii i ergonomiki. 2001. № 4. P. 28–33.

27. *Бодров В.А.* Проблема преодоления стресса. Ч. 2. Процессы и ресурсы преодоления стресса // Психол. журнал. 2006. Т. 27. № 2. С. 113–122.

Bodrov V.A. Problem of stress coping. P. 2. Processes and resources of stress-coping // Psikhologicheskiy zhurnal. 2006. V. 27. № 2. P. 113–122.

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

Maklakov A.G. Personal adaptational potential: its mobilization and prediction under extreme environments // Ibid. 2001. V. 22. № 1. P. 16–24.

29. *Портнова А.Г., Богомолов А.М*. Психологическая защита личности в прогнозе психической адаптации // Сиб. психол. журнал. 2007. № 26. С. 126–128.

Portnova A.G., Bogomolov A.M. Psychological defense of personality in the prediction of psychological adaptation // Sibirskiy psikhologicheskiy zhurnal. 2007. № 26. P. 126–128.

30. *Šolcová I., Tománek P*. Daily stress coping strategies: an effect of hardiness // Studia Psychologica. 1994. V. 36. № 5. P. 390–394.

31. *Козеренко О.П., Следь А.Д., Мирзаджанов Ю.А.* Психологическая поддержка экипажей // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 365–377.

Kozerenko O.P., Sled A.D., Mirzadzhanov Yu.A. Crews' psychological support // Orbital station «Mir». M., 2001. V. 1. P. 365–377.

32. *Antonovsky A.* Health, stress, and coping. San Francisco, 1979.

33. *Sarason I.G., Sarason S.* Social support: theory, research and applications. 1985.

34. Словарь практического психолога / С.Ю. Головин, ред. М., 1998.

Vocabulary of practical psychologist/ S.Yu. Golovin, ed. Moscow, 1998.

35. *Bales R.F., Strodtbeck F.L., Mills T.M. & Roseborough M.E.* Channels of communication in small groups // Am. Sociol. Rev. 1951. V. 16. P. 461–468.

36. *Bales R.F., Slater P.E.* Role differentiation in small decision-making groups // Family, socialization and interaction process / T. Parsons, R.F. Bales, eds. 1955. P. 259–306.

37. *Ломов Б.Ф.* Проблема общения в психологии // Проблема общения в психологии. М., 1981.

Lomov B.F. Problem of communication in psychology // Problem of communication in psychology. Moscow, 1981.

38. *Берн Э*. Трансактный анализ в психотерапии: Системная индивидуальная и социальная психотерапия: Пер. с англ. М., 2006.

Bern E. Transactional analysis in psychotherapy: Systematic individual and social psychotherapy: Transl. from Engl. Moscow, 2006.

Поступила 11.11.2015

METHODOLOGICAL APPROACHES TO CONTENT-ANALYSIS OF SPACECREW COMMUNICATION

Gushchin V.I. Yusupova A.K., Shved D.M., Chekalina A.G., Shueva L.V. Kuznetsova P.G., Vinokhodova A.G., Karpova O.I., Chernova E.G.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 55–64

The paper advances evolution of remote medico-psychological monitoring of spacecrews by instrumentality of communication content-analysis with due respect to the sound encryption rules applied to a limited reproducible set of quantified categories. Proposed estimation criteria for analysis of discussions held by crews and the Mission control center (MCC) about problem situations emerging in long-duration missions are described. Also, the idea that crew communications might be verbal evidence of strategies to cope with stresses in long-duration missions is discussed. Psychological roles within the crew – MCC loop are analyzed in light of E. Berne's transactional communication theory. Results of the approach validation are presented.

Key words: crew communication, content-analysis, transactional communication theory, problem situations, Mission control center, remote psychological monitoring.

УДК 796.01:615.01(075.8)/612.766.1:796

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ-ОПЕРАТОРОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОРРЕКЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА С УЧЕТОМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДАННЫХ ОТ ЖИВОТНЫХ К ЧЕЛОВЕКУ

Гавриш Н.Н., Грабский Ю.В., Панкратов В.В., Аминов А.М., Максимов С.Г., Кущёв Г.Г.

12-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, г. Сергиев Посад, Московская область

E-mail: nicklarksun@mail.ru

Целью работы являлись обоснование и разработка методического подхода к прогнозу работоспособности человека, выполняющего различные виды операторской деятельности, при применении средств коррекции функционального состояния. В задачи работы входило: проведение анализа и обобщение существующих подходов к оценке операторской деятельности и физической работоспособности человека; обоснование требований к клинико-экспериментальным методам оценки физической и оперантной деятельности у биообъектов; разработка метода прогноза работоспособности специалиста-оператора в условиях физического утомления, в том числе при применении средств коррекции функционального состояния.

Ключевые слова: операторская деятельность, работоспособность, средства коррекции, экстремальные условия.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3. С. 65–72.

Разработан методический подход, включающий профессиографический анализ для выявления профессионально важных качеств (ПВК) оператора с комбинированными физическими и умственными нагрузками; проведение испытаний с участием добровольцев (для выявления связи между значениями интегрального (результирующего) показателя операторской работоспособности и динамикой показателей ПВК после выполнения дозированной физической работы); оценку показателей физической выносливости и оперантной деятельности у подопытных животных с использованием дозированной физической нагрузки, а также в условиях применения средств коррекции функционального состояния; осуществление количественного прогноза работоспособности человека-оператора по разработанной регрессии с учетом коэффициентов межвидовой экстраполяции данных об эффектах применения средств коррекции функционального состояния у подопытных животных.

Коррекции функционального состояния организма с целью поддержания достаточного для выполнения поставленной задачи уровня работоспособности человека в экстремальных условиях деятельности до настоящего времени уделялось много внимания исследователей [1]. Фармакологические средства коррекции необходимы для адаптации и реабилитации спортсменов во время тренировочного цикла, различных категорий летного состава, сотрудников силовых ведомств и МЧС, а также других специалистов при работе, сопровождающейся значительными физическими и нервно-эмоциональными нагрузками. Большинство из них направлены на коррекцию физической составляющей работоспособности, однако во многих профессиях предъявляются высокие требования и к качеству операторской деятельности на фоне развивающегося физического утомления.

В работах [2–7] было установлено, что различные факторы деятельности, в том числе тяжелые физические нагрузки, обусловливают ухудшение качества выполнения легких заданий на 10 % при незначительном снижении операторской работоспособности. При развитии утомления средней степени скорость и точность как простых, так и сложных операций снижается на 10–50 %, при выраженном утомлении – на 50–100 %.

В экстремальных условиях работы оператора могут проявиться такие побочные эффекты влияния препаратов на операторскую деятельность и (или) физическую работоспособность, которые не были выявлены на этапах доклинического и клинического изучения действия средств. При этом, рассматривая физическую и умственную деятельность в совокупности, нельзя исключить противоположное влияние препарата на разные виды работоспособности. Однако проведение исследований с применением перспективных фармакологических соединений и рецептур с участием добровольцев

не всегда возможно, экономически оправданно и этически приемлемо [8]. Следовательно, обоснование и разработка методического подхода к прогнозу работоспособности человека, выполняющего различные виды операторской деятельности при применении средств коррекции его функционального состояния, по результатам испытаний с участием добровольцев (без применения ими средств коррекции) и экспериментальных исследований на животных являются актуальной самостоятельной задачей.

Для изучения модифицирующего влияния средств коррекции на физическую и умственную работоспособность людей, в том числе в условиях экстремального воздействия различных физико-химических факторов, на этапе доклинического исследования обычно используют экспериментальные модели [1, 9, 10]. С этой целью проводят опыты на животных, рассматривая биообъекты как модель человека при соответствующем заданном воздействии.

Прогноз уровня работоспособности человека в повседневных и экстремальных условиях функционирования может быть осуществлен с применением метода имитационного моделирования его деятельности [11]. Наполнение базы исходных данных для имитационной модели работоспособности человека количественными показателями изменения его психофизиологических возможностей в зависимости от комплекса воздействующих факторов проводится с использованием методов экспериментального моделирования условий конкретной деятельности. Применяемые при этом методики физиологического и психофизиологического обследования испытуемых ориентированы на получение показателей, отражающих текущее состояние ПВК, необходимых рассматриваемым категориям специалистов в процессе их деятельности.

В этой области применимы различные адаптированные к реальным условиям методы профессиографических и психофизиологических исследований. Разработанные в настоящее время психофизиологические методы базируются на современных представлениях о механизмах нарушения умственной и физической работоспособности человека. Применение современных психофизиологических методов в ходе целевых исследований с участием добровольцев-испытуемых может дать достаточное представление о функциональных возможностях человека-оператора в некотором заданном ограниченном наборе условий его деятельности [12].

Для оценки операторской деятельности человека в экстремальных условиях необходимо разработать комплексный методический подход, включающий психологические, психофизиологические, функциональные и математические методы. С помощью психологических методов определяется наличный и требуемый уровень ПВК. Физиологические методы применяют для определения функционального состояния оператора в процессе деятельности и реакций различных систем организма на выполнение требуемой работы, с возможностью оценки его физической работоспособности. Математические методы применяются для статистической обработки результатов наблюдений и моделирования, деятельности оператора и позволяют получить суммарные показатели качества его работы.

Однотипность физиолого-биохимических процессов обеспечения мышечной деятельности у человека и других млекопитающих позволяет в экспериментах на лабораторных животных оценить физическую работоспособность, в том числе в условиях превышения воздействия факторов над уровнем установленных гигиенических нормативов, и провести экстраполяцию полученных данных к человеку. Существенным преимуществом такого подхода является возможность получения оценок предельных возможностей организма при выполнении простой динамической работы.

Возможности методов исследования физической работоспособности в эксперименте разнообразны. Можно условно разделить методы нагружения на «утомляющие» и «неутомляющие». К 1-му классу методов, в частности, относятся: побежка животных по «бесконечному» вертикальному канату, ленте тредбана до полного изнеможения и отказа от выполнения теста; плавание, в том числе и с применением груза; удержание животных на вертикальном шесте, отражающее статическую выносливость биообъектов. Нагрузки такого класса приводят к значительному расходованию внутренних энергоресурсов, истощая физиолого-биохимические резервы организма, и не позволяют использовать животных для проведения многократных исследований через небольшие промежутки времени. К числу недостатков методик оценки длительного выполнения физической работы до отказа относится субъективность самого понятия «отказ», в большой мере зависящего от уровня стимулирования биообъекта к выполнению работы. В условиях мотивации преодоление утомления позволяет продлить работу до такого предельного времени, когда выраженные нарушения деятельности центральной нервной системы (ЦНС) приведут к возникновению автоматического (непроизвольного) отказа.

Дозирование нагрузок, предъявляемых животным, путем ограничения проплываемого расстояния, лимитирования времени бега с заданной скоростью на тредбане, стимулирования к преодолению калиброванных препятствий нарастающей высоты, кратковременного измерения мышечной силы и моторной координации не исчерпывает функциональных резервов организма животных и не отражается на результатах повторных измерений через

относительно короткие, в пределах десятков минут, интервалы времени. Однако возможность многократных исследований работоспособности по дозированной интенсивности предъявляемых нагрузок на одних и тех же животных не устраняет трудности объективизации влияния модифицирующих факторов на выносливость в условиях развивающегося утомления и психоэмоционального стресса [13].

Анализ данных литературы показал, что с помощью методов исследования функционального состояния ЦНС и поведения животных возможно прямо или косвенно оценить отдельные показатели качества оперантной деятельности. К наиболее многочисленным и распространенным относятся методы по выработке условного рефлекса активного избегания. Это связано, прежде всего, с простотой их воспроизведения на мелких лабораторных животных. Данные методы характеризуются достаточно быстрой выработкой и сохранением условного рефлекса, а также позволяют использовать животных для проведения многократных исследований через короткие промежутки времени. Достоинством методов является возможность автоматизации исследования для исключения субъективного влияния экспериментатора на получаемые результаты. Кроме того, эти методы позволяют дозировать объем и интенсивность работы, выполняемой животным, обеспечить постоянство условий для проведения опыта, и, следовательно, снизить влияние других неконтролируемых факторов на получаемые результаты. При этом регистрируют такие показатели оперантной деятельности биообъекта, как период времени, объем и точность выполнения задания, используемые для межвидовой экстраполяции данных.

Как отмечено, по результатам исследования на животных возможно оценить выполнение лишь составляющих элементов моделируемой операторской деятельности при применении средств коррекции, а не деятельность в целом [14], в то время как у человека необходимо прогнозировать показатель качества всей операторской деятельности, а не ее элементов. Анализ материалов в обзорах [14, 15] свидетельствует, что при экстраполяции от животных к человеку результатов выполнения элементарных действий можно ожидать сходства в порядке величины регистрируемых показателей. При использовании же сложных навыков, учитывая более высокий уровень организации ЦНС человека (функциональных возможностей и компенсаторных способностей), следует ожидать меньшую выраженность нарушений простой операторской деятельности человека по сравнению с изменениями условно-рефлекторной деятельности биообъектов. Учитывая также известные допущения по моделированию умственной деятельности человека в опытах на лабораторных животных, экстраполяционные коэффициенты следует рассчитывать по соотношению среднегруппового (для анализируемой выборки) значения исследуемого показателя у человека к соответствующему показателю видовой нормы у подопытных животных.

Методики оценки функции памяти, внимания, эмоционального состояния и моторной координации являются важнейшим дополнением к основным методам изучения оперантной деятельности животных, так как направлены на исследование несколько иных (сопутствующих) проявлений функционирования ЦНС.

Получаемые с помощью методов условных рефлексов результаты исследования памяти и внимания у подопытных животных трудно охарактеризовать количественно. Поэтому целесообразно использовать дополнительные, более специфические методы, такие как «обучение пространственному навыку» в сложных лабиринтах или обучение пищедобывательному навыку в боксе с несколькими отверстиями [16]. Общим недостатком таких методов является большая длительность и трудоемкость обучения подопытных животных.

Таким образом, на основании анализа приведенных выше методик были выявлены как преимущества, так и недостатки их использования. С учетом изложенного были разработаны следующие требования к экспериментальным результатам, получаемым для решения задачи прогноза работоспособности человека, выполняющего различные виды операторской деятельности, при применении средств коррекции функционального состояния:

– экспериментальные данные должны оцениваться и представляться в количественном виде;

– полученные результаты должны соответствовать принятым в спортивной медицине и физиологии труда закономерностям изменения в зависимости от интенсивности нагрузки и напряженности трудового процесса;

– исследуемые показатели должны быть чувствительными к модифицирующему влиянию применяемых средств коррекции функционального состояния;

– регистрация значений показателей (проведение теста) у животных должна быть кратковременной (не более 5–20 мин);

– тестирование добровольцев-испытуемых и животных не должно значительно истощать функциональные резервы организма, и, кроме того, должно позволять проводить исследования у одних и тех же биообъектов через относительно короткие промежутки времени (2…4 ч) после применения средств коррекции;

– результаты должны быть пригодными для прогноза предельных возможностей организма и определения показателей оперантной деятельности после физической работы заданной интенсивности;

Таблица 1

Схема научно-методического подхода к прогнозу работоспособности специалистов в экстремальных условиях деятельности и применения средств коррекции функционального состояния организма

<table>
<tr><td colspan="4">Аналитические исследования</td></tr>
<tr><td colspan="2">Анализ данных о профессионально важных качествах (ПВК) специалистов-операторов в экстремальных условиях деятельности</td><td colspan="2">Анализ методов оценки условно-рефлекторной деятельности (УРД), поведенческих и зоопсихологических реакций подопытных животных</td></tr>
<tr><td colspan="4">Экспериментальные исследования</td></tr>
<tr><td colspan="2">Испытания на добровольцах</td><td colspan="2">Эксперименты на животных</td></tr>
<tr><td>Оценка физической работоспособности (ФР) испытуемых</td><td>Оценка ПВК испытуемых в покое</td><td>Оценка УРД, поведенческих реакций, моторной координации и памяти животных без физической нагрузки (в покое)</td><td>Оценка УРД, поведенческих реакций, моторной координации и памяти животных после физической нагрузки</td></tr>
<tr><td colspan="2">Оценка ПВК испытуемых после физической нагрузки</td><td colspan="2">Оценка УРД, поведенческих реакций, моторной координации и памяти животных после физической нагрузки в условиях применения средств коррекции функционального состояния</td></tr>
<tr><td colspan="2">Оценка качества операторской деятельности испытуемых после физической нагрузки</td><td colspan="2">Оценка показателей ФР животных после применения средств коррекции функционального состояния</td></tr>
<tr><td colspan="2">Система исходных данных об изменениях ПВК и операторской деятельности испытуемых после физической нагрузки</td><td colspan="2">Система исходных данных об изменениях ФР, УРД, моторной координации, памяти и поведения крыс после физической нагрузки и применения средств коррекции функционального состояния</td></tr>
<tr><td colspan="4">Расчетно-теоретические исследования</td></tr>
<tr><td colspan="2">Разработка модели деятельности специалиста-оператора заданной профессиональной категории в экстремальных условиях</td><td colspan="2">Обоснование способа и расчет коэффициентов экстраполяции показателей оперантной деятельности животных после физической нагрузки и применения средств коррекции функционального состояния</td></tr>
<tr><td colspan="4">Расчетные оценки прогноза физической работоспособности и качества операторской деятельности человека после физической нагрузки и применения средств коррекции функционального состояния</td></tr>
</table>

– результаты должны обеспечивать экстраполяцию данных о физической работоспособности и операторской деятельности от животных к человеку;

– данные должны быть применимы для прогноза операторской деятельности человека на фоне развивающегося утомления и в условиях применения средств коррекции функционального состояния организма.

С учетом изложенного нами разработан методический подход к прогнозу работоспособности специалистов-операторов в экстремальных условиях деятельности при применении средств коррекции функционального состояния организма, представленный в табл. 1.

В соответствии с данным подходом сначала выявляют профессионально важные качества у человека-оператора соответствующего вида деятельности в условиях интенсивных физических нагрузок. Устанавливают интегральный показатель качества операторской деятельности (например, результат стрельбы). На основании этого определяют структуру ПВК – психофизиологических и психологических свойств индивида, имеющих решающее значение для эффективного выполнения им конкретного вида деятельности.

Наиболее простым и удобным способом определения перечня ПВК, необходимых для выполнения умственной деятельности индивидом, является профессиографическое исследование. Профессиография представляет собой многоаспектное комплексное изучение и описание трудовой деятельности человека в его взаимодействии со средствами труда и средой [17, 18]. Одним из способов профессиографии является опрос экспертов с использованием специальных анкет [19]. Экспертов отбирают из наиболее опытных специалистов в рассматриваемом виде труда.

На этапе разработки анкеты определяют группы ПВК, которые подлежат исследованию. К ним относятся аттенционные свойства и наблюдательность, мнестические свойства, моторные, сенсорные, имажинитивные, мыслительные, речевые, коммуникативные, волевые качества и эмоциональная устойчивость. За основу может быть принята, например, модифицированная профессиографическая анкета Липмана.

Оценивают текущие значения показателей ПВК испытуемого. В настоящее время существует широкий выбор методик психологических и психофизиологических исследований, позволяющих оценить в динамике практически все известные индивидуальные качества человека.

Далее вычисляют интегральный (результирующий) показатель качества операторской деятельности заданного профиля у испытуемых (например, среднее отклонение от центра мишени при стрельбе в электронном тире) в покое.

Затем оценивают изменения уровня ПВК и показателя операторской деятельности после дозированной динамической физической работы (например, в виде бега по ленте тредбана) [7]. Исходя из линейной связи мощности нагрузки и частоты сердечных сокращений (ЧСС), мощность нагрузки (т.е. скорость ленты тредбана) задают для конкретного испытуемого, принимая во внимание соответствия его ЧСС величине 150 уд/мин. Длительность периода такой субмаксимальной нагрузки устанавливают одинаковой для всех испытуемых (например, 20 мин). При этом полагают, что «физиологическая стоимость» выполнения работы различными испытуемыми равнозначна. Предъявление физической нагрузки производят при мониторировании ЧСС, потребления кислорода, а также контроле уровней субстратов и продуктов энергетического метаболизма (например, лактата и глюкозы крови) у испытуемых. На основании измерения указанных показателей энергообеспечения по известным соотношениям у испытуемых можно оценить предельную продолжительность выполнения работы заданной интенсивности.

Сразу после выполнения дозированной физической работы у испытуемых повторно оценивают значения показателей ПВК и интегрального показателя качества операторской деятельности. Определяют изменения среднегрупповых значений ПВК испытуемых после выполнения физической нагрузки относительно исходного уровня в покое. Задачей этого этапа исследования является получение исходных данных для построения аппроксимационной модели – уравнения множественной линейной регрессии, отражающей зависимость качества операторской деятельности от изменения уровней ПВК после физической нагрузки.

На следующем этапе проводят моделирование элементов операторской деятельности человека в эксперименте на подопытных животных с использованием дозированной физической нагрузки. Исследуют функциональное состояние ЦНС по данным оценки условно-рефлекторной деятельности, поведенческих реакций биообъектов как эволюционно обусловленных функциональных аналогов (элементарных актов) реагирования млекопитающих на несложные сходные ситуации, требующие анализа, осмысления и принятия решения. При этом в модельных экспериментах на биообъектах необходимо использовать такие методы и способы оценки заученных навыков и ориентировочно-исследовательских реакций, которые бы позволили в последующем осуществить экстраполяцию результатов к конкретным видам операторской деятельности.

Рассчитывают значения изменений, выраженные в долях исходного уровня, показателей оперантной деятельности лабораторных животных (например, латентный период и объем выполнения

Таблица 2

Шкала оценки качества выполнения операторской деятельности человека после модифицирующего влияния физической нагрузки и средств коррекции

Изменение показателя качества выполнения операторской деятельности (К), % от исходного значения	Наименование градации изменения качества выполнения операторской деятельности
К < -30	Резко снижено
-15 < К ≤ -30	Существенно снижено
-5 < К ≤ -15	Умеренно снижено
К = ±5	Не изменено
+5 < К ≤ +15	Умеренно повышено
+15 < К ≤ +30	Существенно повышено
К > +30	Резко повышено

условно-рефлекторного задания, состояние функции памяти, моторной координации и т.д.) в покое, а затем после дозированной физической динамической нагрузки субмаксимальной интенсивности.

Предъявление дозированной физической нагрузки биообъектам осуществляют по общепринятым методам. Мощность физической нагрузки, выраженная в относительных величинах максимальной производительности, должна соответствовать нагрузке, применяемой у испытуемых. В целях экстраполяции у млекопитающих удобно выражать мощность нагрузки в долях максимального потребления кислорода. Уровень нагрузки можно рассчитать эмпирически или на основании имеющихся данных литературы для выбранных методики и вида лабораторных животных.

На следующем этапе проводят оценку модифицирующего влияния примененных средств коррекции функционального состояния на показатели оперантной деятельности животных в покое и после дозированной физической нагрузки. Регистрируют показатели физической работоспособности и оценивают предельную физическую выносливость биообъектов при применении средств коррекции.

С использованием множественной линейной регрессии аппроксимируют зависимость интегрального показателя качества от изменения определяющих элементов операторской деятельности добровольцев-испытуемых после выполнения дозированной физической работы.

Определяют коэффициенты экстраполяции оперантной деятельности животных к человеку-оператору. Для этого рассчитывают значения изменений, выраженные в долях исходного уровня, показателей операторской деятельности, выбранных в качестве ПВК (например, латентный период зрительно-моторной реакции, устойчивость внимания, объем оперативной памяти, моторная координация и т.д.) добровольцев-испытуемых после преодоления дозированной физической нагрузки. Затем рассчитывают значения изменений, выраженные в долях исходного уровня, показателей оперантной деятельности лабораторных животных (например, латентный период и объем выполнения условно-рефлекторного задания, показатели памяти, моторной координации и т.д.) после преодоления дозированной физической нагрузки, а также в условиях применения средств коррекции. Далее осуществляют сопоставление выраженности средневзвешенных величин изменений каждого ПВК испытуемых и соответствующего показателя у лабораторных животных.

На основании оценок модифицирующего влияния средств коррекции у животных сопоставляют изменения с уровнем контроля в долях видовой нормы и делают прогнозные оценки физической работоспособности человека при применении указанных средств.

На конечном этапе осуществляют прогноз качества операторской деятельности человека с использованием указанной регрессионной модели на основе учета изменений уровней каждого из ПВК испытуемых после физической нагрузки и коэффициентов модифицирующего влияния применения средств коррекции у подопытных животных.

Основываясь на известном подходе к оценке работоспособности спортсменов для принятия решения об уровнях их готовности к участию в соревнованиях [20], авторы предложили следующую шкалу условных градаций изменения качества выполнения операторской деятельности (после физической нагрузки) за счет применения средств коррекции функционального состояния организма (табл. 2).

Выводы

1. На основе теоретико-экспериментальных исследований разработан методический подход к осуществлению количественного прогноза работоспособности человека-оператора в условиях утомления и после приема фармакологических средств коррекции функционального состояния организма,

включающий профессиографический анализ работы оператора, проведение исследований операторской деятельности у добровольцев с оценкой отличия показателей от исходного уровня после дозированной физической нагрузки, оценку показателей физической выносливости и оперантной деятельности у подопытных животных после дозированной физической нагрузки и экстраполяцию экспериментальных данных от подопытных животных к человеку в подобных условиях.

2. Разработанный и представленный методический подход целесообразно применять при испытании новых средств коррекции функционального состояния организма контингентов лиц операторского профиля, связанных со значительными нервно-психическими и физическими нагрузками, в интересах обоснования наиболее перспективных фармакологических соединений, а также оптимизации расходов на скрининговые исследования инновационных фармакологических препаратов и рецептур.

Список литературы

1. *Пыжикова Ж.В.* Профессиональная работоспособность: средства и методы сохранения. Самара, 2007.

Pyzhikova Zh.V. Professional performance: the means and methods of preservation. Samara, 2007.

2. *Бобков Ю.Г., Елькин А.И., Кржижановский С.А., Лосев А.С.* Биохимические и электрофизиологические показатели максимальных физических нагрузок и периода восстановления // Кислородные режимы организма, работоспособность, утомление при напряженной мышечной деятельности. Вильнюс, 1984. С. 12.

Bobkov Yu.G., Elkin A.I., Krzhizhanowskiy S.A., Losev A.S. Biochemical and electrophysiological parameters of maximal physical exercises and recovery period // The oxygen regime of a human organism, performance, fatigue during intense muscle activity. Vilnius, 1984. P. 12.

3. *Кудрин И.Д., Сулимо-Самуйло З.К., Шабалин В.А.* Некоторые особенности изменения работоспособности человека в экстремальных условиях // Воен.-мед. журн. 1984. № 11. С. 38–39.

Kudrin I.D., Sulimo-Samuylo Z.K., Shabalin V.A. Some features of the changes in human performance in extreme conditions // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 1984. № 11. P. 38–39.

4. *Усик С.В., Ленкова Р.И.* Биоэнергетическая характеристика физических нагрузок различного характера // Физиол. журн. СССР. 1981. Т. 67. № 79. С. 1370–1376.

Usik S.V., Lenkova R.I. Bioenergy characteristics of the different physical loads // Fiziologicheskiy zhurnal USSR. 1981. V. 67. № 79. P. 1370–1376.

5. *Ушаков И.Б., Зорилэ В.И.* Медицинское обоснование системы активного обеспечения безопасности полетов на современных летательных аппаратах // Воен.-мед. журн. 2001. № 2. С. 62–68.

Ushakov I.B., Zorile V.I. Medical justification of a system of flight security on modern aircrafts // Voenno-medicinskiy zhurnal. 2001. № 2. P. 62–68.

6. *Шалимов П.М., Усов В.М., Глухов Д.В., Измалков П.В.* Автоматизированная система интегральной оценки функциональных резервов военнослужащих // Там же. 1999. № 5. С. 45.

Shalimov P.M., Usov V.M., Glukhov D.V., Izmalkov P.V. Automated system of integrated evaluation of functional backup of soldiers // Ibid. 1999. № 5. P. 45.

7. *Ястребов Д.В., Благинин А.А., Шустов Е.Б., Бахтин М.Ю.* Динамика психофизиологических показателей в процессе развития физического утомления // Тез. докл. научн. конф. «Человек в авиации и космонавтике: прошлое, настоящее, будущее». М., 1995. С. 414.

Yastrebov D.V., Blaginin A.A., Shustov E.B., Bakhtin M.Yu. Dynamics of psychophysiological figures during physical fatigue // Tezisy dokladov nauchnoy koferentsii «Chelovek v aviatsii i kosmonavtike: proshloe, nastoyashchee, budushchee». Moscow, 1995. P. 414.

8. Правила доклинической оценки безопасности фармакологических средств (GLP): Пер с англ. М., 1992.

Rules of preclinical safety evaluation of pharmacological agents (GLP): Transl. from English. Moscow, 1992.

9. *Богомолов А.В., Гридин Л.А., Кукушкин Ю.А., Ушаков И.Б.* Диагностика состояния человека: математические подходы. М., 2003.

Bogomolov A.V., Gridin L.A., Kukushkin Yu.A., Ushakov I.B. Diagnosis of the human condition: mathematical approaches. Moscow, 2003.

10. Экспериментальные модели в гигиенических исследованиях // Гигиеническая наука и практика на рубеже XXI века: Матер. IX Всероссийского съезда гигиенистов и санитарных врачей. Т. I. М., 2001. С. 476–479.

The experimental model in the hygienic sanitary studies // Gigienicheskaya nauka i praktika na rubezhe XXI veka. Materialy IX Vserossiyskogo s'ezda gigienistov i sanitarnykh vrachey. V. I. Moscow, 2001. P. 476–479.

11. *Моисеев Н.Я.* Возможности прогнозирования профессионального здоровья человека-оператора по общедоступным показателям // Матер. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы военной и экстремальной медицины». М., 1994. С. 187–188.

Moiseev N.Ya. Predicting possibilities of an operator's professional health according to public figures // Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye problemy voennoy and ekstremalnoy meditsiny». Moscow, 1994. P. 187–188.

12. *Танчук М.И., Кондратов И.М.* Возможные подходы к оценке вероятной токсичности химических ве-ществ применительно к человеку // Вестн. Санкт-Петербургской гос. академии им. И.И. Мечникова. 2007. №1(8). С. 183–186.

Tanchuk M.I., Kondratov I.M. Possible approaches to the assessment of the likely-to toxic chemicals applied to man

// Vestnik Sankt-Petersburgskoy gosudarstvennoy academii im. I.I. Mechnikova. 2007. №1 (8). P. 183–186.

13. *Мозжухин А.С.* Проблема резервов в физиологии спорта // Физиологические механизмы адаптации организма спортсменов к мышечной работе различного вида, мощности и продолжительности. М., 1980. С. 5–22.

Mozzhukhin A.S. The problem of reserves in sports physiology // Physiological mechanisms of sportsmen's adaptation to the muscular work of various kinds, power and duration. Moscow, 1980. P. 5–22.

14. *Даренская Н.Г. и др.* От эксперимента на животных – к человеку: поиски и решения: Монография. Воронеж, 2010.

Darenskaya N.G. et al. From the experiment on animals – to man: search for solutions: Monograph. Voronezh, 2010.

15. *Даренская Н.Г., Ушаков И.Б., Иванов И.В. и др.* Экстраполяция экспериментальных данных на человека: принципы, подходы, обоснование методов и их использование в физиологии и радиобиологии: Руководство. М.; Воронеж, 2004.

Darenskaya N.G., Ushakov I.B., Ivanov I.V. et al. Extrapolation of the experimental data to man: principles, approaches, methods and their use in physiology and radiobiology: Manual. Moscow; Voronezh, 2004.

16. *Буреш Я., Бурешова О., Хьюстон Дж.П.* Методики и основные эксперименты по изучению мозга и поведения: Пер. с англ. М., 1991.

Buresh Ya., Bureshova O., Hyuston Dzh.P. Methods and basic experiments on the brain and behavior: Transl from Engl. Moscow, 1991.

17. *Бодров В.А.* Психология профессиональной пригодности: Учеб. пос. для вузов. 2-е изд. М., 2006.

Bodrov V.A. Psychology of professional suitability: Textbook. 2-nd ed. Moscow, 2006.

18. Основы военного профессионального психологического отбора: Учеб. пос. М., 2005.

Fundamentals of military professional psychological selection: Textbook. Moscow, 2005.

19. *Стрелков Ю.К.* Инженерная и профессиональная психология. М., 2001.

Strelkov Yu.K. Engineering and professional psychology. Moscow, 2001.

20. *Шубин М.А., Белов М.С., Чичикин В.А.* Способ определения уровня силовой подготовки спортсменов в отдельных видах пауэрлифтинга // Междунар. журн. эксп. образования. 2014. № 7–1. С. 91.

Shubin M.A., Belov M.S., Chichikin V.A. A determining method of athletes' strength training level in some types of power lifting // Mezhdunarodniy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya. 2014. № 7–1. P. 91.

Поступила 15.06.2015

METHODICAL APPROACH TO PREDICTING EFFICIENCY OF PROFESSIONAL OPERATORS IN EXTREME CONDITIONS USING PHARMACOLOGICAL AGENTS TO CORRECT THE FUNCTIONAL STATE OF ORGANISM BASED ON ANIMAL DATA EXTRAPOLATION ON HUMANS

Gavrish N.N., Grabsky Yu.V., Pankratov V.V., Aminov A.M., Maksimov S.G., Kushchev G.G.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 3. P. 65–72

The work was aimed at scientific justification and development of a method to predict efficiency of human operators using body-supporting medications. The objectives were to analyze and summarize the existing methods of assessing operator' mental and physical performance, set requirements to clinical and experimental methods of physical and operant testing of bio-objects; develop a method to predict operator's efficiency in the conditions of physical fatigue, and using body-supporting medications.

Key words: operator's activity, performance, means of correction, extreme conditions.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами ведущих специалистов
в области космической медицины и биологии,
сотрудников ИМБП:

Асейчева Анатолия Владимировича,

Затолокину Татьяну Григорьевну,

Карпову Ольгу Ивановну,

Климарева Сергея Ивановича,

Кузнецову Инну Анатольевну,

Левинских Маргариту Александровну,

Пахомова Андрея Ивановича,

Степанову Галину Павловну,

Суструева Дмитрия Валерьевича,

Фадина Валерия Георгиевича

Добрые вам пожелания и плодотворного сотрудничества
с нашим журналом!