АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА
AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Орлов О.И., д.м.н., академик РАН

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

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

2019 Т. 53 № 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, 2019
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2019

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

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

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

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

Сдано в набор 04.06.2019
Подписано в печать 21.06.2019
Формат 60 × 84 1/8
Гарнитура Tahoma
Печать офсетная
Усл. печ. л. 13,25
Тираж 180 экз
Заказ № 143

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

Содержание

Contents

Обзоры

Reviews

Кудрявцева Н.С. Анализ показателей надежности и эквивалентной массы систем жизнеобеспечения для полетов в дальний космос **5**

Kudryavtseva N.S. Analysis of reliability and equivalent mass of life support systems for remote space missions

Поляков А.В., Усов В.М., Крючков Б.И., Косачев В.Е., Михайлюк М.В., Мотиенко А.И. Компьютерное моделирование жизнеугрожающих ситуаций и проведения аварийно-спасательных, медицинских и эвакуационных мероприятий на лунной базе **13**

Polyakov A.V., Usov V.M., Kryuchkov B.I., Kosachev V.E., Mikhailyuk M.V., Motienko A.I. Computer simulation of life-threatening situations and rescue, medical and evacuation activities on a lunar base

Вассерман Е.Л., Денисова Д.М., Рудницкий С.Б. Методы дистанционного бесконтактного измерения физиологических показателей человека для диагностики и мониторинга его функционального состояния **20**

Wasserman E.L., Denisova D.M., Roudnitsky S.B. Methods of remote noninvasive recording of human physiological parameters for functional diagnostics and monitoring

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Бадаква А.М., Миллер Н.В., Зобова Л.Н., Рощин В.Ю. Исследование влияния опорной разгрузки на корковые механизмы управления движениями руки в иммерсионных экспериментах на обезьянах **33**

Badakva A.M., Miller N.V., Zobova L.N., Roshchin V.Yu. Studies of the plantar unloading effect on cortical mechanisms of arm movements control in immersion experiments with primates

Дадашева О.А., Гурьева Т.С., Грушина О.А., Медникова Е.И., Ионов С.В., Сычев В.Н. Особенности строения глаза у рыб Danio rerio, находившихся в условиях микрогравитации **39**

Dadasheva O.A., Gurieva T.S., Grushina O.A., Mednikova E.I., Ionov S.V., Sychev V.N. Characteristics of the eye structure in fish Danio rerio after exposure in microgravity

Мальцев В.Н., Ушаков И.Б. Информационно-энтропийный анализ картины белой крови у вертолетчиков, принимавших участие в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС **43**

Maltsev V.N., Ushakov I.B. Entropy information analysis of the white blood profile in helicopter pilots – participants in elimination of the Chernobyl nuclear power station accident

Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Авиационный шум: особенности формирования и профилактики нейросенсорной тугоухости у авиационных специалистов военно-воздушных сил **49**

Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise: features of progression and prevention of sensorineural hearing loss in Air Force aviation specialists

Павлов К.И., Сырцев А.В., Мухин В.Н., Архимук А.Н., Михеев А.В., Копытова Ю.С., Хамитова Е.А., Сысоев В.Н., Петренко М.И. Определение информативности электрофизиологических показателей для оценки военно-профессиональной адаптации курсантов военно-морского института **57**

Pavlov K.I., Syrtsev A.V., Mukhin V.N., Arkhimuk A.N., Mikheev A.V., Kopytova Yu.S., Khamitova E.A., Sysoev V.N., Petrenko M.I. Analysis of informativity of electrophysiological data in context of rating military occupational adaptation of naval school students

Королёв В.А., Калинкин Л.А., Иванов И.В. Экспертная оценка направлений снижения травматизма у спортсменов **67**

Korolev V.A., Kalinkin L.A., Ivanov I.V. Expert review of the ways to reduce the injury rate among athletes

Иванов Ю.В., Яснецов Вик.В., Карсанова С.К., Яснецов В.В. Антиамнестические свойства новых производных 3-гидроксипиридина **76**

Ivanov Yu.V., Yasnetsov Vik.V., Karsanova S.K., Yasnetsov V.V. Antiamnestic properties of new 3-hydroxypyrites derivatives

Харин С.А., Новикова Н.Д., Смирнов Ю.И., Поддубко С.В., Феттер В., Хуммель Т., Рейдт У., Хельвиг А., Ленич Й., Гроссер Я. Исследование микробной обсемененности поверхностей интерьера Международной космической станции с помощью портативной газовой сенсорной системы «Э-НОС» **81**

Kharin S.A., Novikova N.D., Smirnov Yu.I., Poddubko S.V., Fetter V., Hummel T., Reidt U., Helvig A., Leenich J., Grosser Y. Investigation into microbial contamination of the International space station interior with portable gas sensing system «E-Nose»

Тихомиров А.А., Хижняк С.В., Ушакова С.А., Тихомирова Н.А., Павлова А.М. Фузариоз как фактор риска при культивировании пшеницы в условиях искусственных экосистем **89**

Tikhomirov A.A., Khizhnyak S.V., Ushakova S.A., Tikhomirova N.A., Pavlova A.M. Fusarium root rot as a risk factor for cultivating wheat in artificial eco-systems

Величко В.В., Ушакова С.А., Трифонов С.В., Тихомиров А.А. Оценка физико-химической минерализации соломы на формирование урожая пшеницы при выращивании на почвоподобном субстрате **97**

Velichko V.V., Ushakova S.A., Trifonov S.V., Tikhomirov A.A. Evaluation of the effect of straw physical-chemical mineralization on the yield of wheat grown on soil-like substrate

Краткие сообщения

Brief Communications

Сервули Е.А., Пономарев С.А., Шевченко М.А. Выбор оптимальной модели овальбумин-индуцированного аллергического воспаления дыхательных путей для оценки особенностей воспалительного ответа у мышей при моделировании эффектов микрогравитации в условиях антиортостатического вывешивания **104**

Servuli E.A., Ponomarev S.A., Shevchenko M.A. Choice of an optimal model of ovalbumin-induced allergic airways inflammation to assess the inflammatory response in mice exposed to tail suspended simulation of the effects of microgravity

Вонарошенко А.П., Засядько К.И., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Язлюк М.Н. Исследование возможностей развития специальных физических качеств летчиков-инструкторов путем тренировки статической выносливости **108**

Vonarshenko A.P., Zasiad'ko K.I., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Yazlyuk M.N. Study of the possibility to develop special physical qualities in flight instructors by static stability training

ОБЗОРЫ

УДК 629.7.048

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МАССЫ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛЕТОВ В ДАЛЬНИЙ КОСМОС

Кудрявцева Н.С.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

E-mail: nkudr@mail.ru

Проведена первоначальная приближенная оценка показателей надежности и эквивалентной массы типовых вариантов систем жизнеобеспечения (СЖО) космических аппаратов для 1000-суточного автономного космического полета с использованием надежностных и массоэнергетических характеристик регенерационных подсистем, используемых на Международной космической станции. Надежность СЖО оценивается вероятностью потери экипажа, а массоэнергетические характеристики – суммарной эквивалентной массой в расчете на одного члена экипажа и равной взлетной массе системы. Учитывая степень замкнутости, рассмотрены 4 типовых варианта физико-химических СЖО: на основе запасов веществ, комбинированная, частично замкнутая и максимально замкнутая. Требуемый уровень надежности СЖО на основе запасов веществ достигается при введении 10 % запасов кислорода, воды, адсорбента углекислого газа и обезвоженных продуктов питания. Для 3 других вариантов СЖО помимо аналогичных 10 % запасов веществ требуется введение запасных блоков и многократного ненагруженного резервирования всех жизненно важных подсистем регенерации. Для комбинированной СЖО требуется четырехкратное, а для частично и максимально замкнутых СЖО – пятикратное ненагруженное резервирование. Определены дальнейшие пути снижения резервирования подсистем регенерации для уменьшения суммарной эквивалентной массы СЖО при требуемом уровне надежности.

Ключевые слова: система жизнеобеспечения, вероятность потери экипажа, эквивалентная масса.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 5–12.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-5-12

При выборе варианта системы жизнеобеспечения (СЖО) космических аппаратов (КА) для полетов в дальний космос одним из основных требований становится обеспечение высокой надежности системы, которая оценивается вероятностью потери экипажа. Как правило, вероятность потери экипажа за все время полета оценивается в 0,01, тогда вероятность потери экипажа по причине отказов в СЖО должна быть, по крайней мере, на порядок меньше и не превышать 0,001 [1]. Причинами потери экипажа могут быть отсутствие кислорода в течение нескольких минут, отсутствие питьевой воды и прекращение очистки атмосферы гермообъема от углекислого газа в течение 2–3 дней и отсутствие продуктов питания в течение 2 мес.

Требуемый уровень надежности СЖО очень высокий и может быть обеспечен только с помощью дополнительных запасов веществ и резервирования подсистем, наименее надежных блоков и элементов этих подсистем, что приводит к увеличению эквивалентной массы, а следовательно, и стартовой массы СЖО. В ряде работ [1–4] представлены подходы, методы и модели для оценки надежности и эквивалентной массы СЖО различного состава с многочисленными упрощениями и неопределенностями на длительные сроки автономного полета космического аппарата (КА) с различным количеством членов экипажа. При этом массоэнергетические и надежностные характеристики элементов, блоков и подсистем соответствуют характеристикам регенерационных СЖО, разработанных в США и ЕКА и используемых на Международной космической станции (МКС). Показано, что чем ниже степень замкнутости системы, тем выше ее надежность, но тем больше будет ее эквивалентная масса.

В данном обзоре ставится задача провести первоначальную упрощенную оценку и анализ показателей надежности и эквивалентной массы СЖО КА для полетов в дальний космос на базе характеристик регенерационных СЖО, применяемых на российском модуле МКС и перспективных, разрабатываемых в РФ. Рассматриваются 4 типовые варианта физико-химических СЖО с различной степенью замкнутости [5, 6]:

1) СЖО на основе запасов веществ;
2) комбинированная СЖО;
3) частично замкнутая СЖО;
4) максимально замкнутая СЖО.

Приняты следующие допущения, основанные на специфических требованиях к СЖО для автономного

полета без пополнения запасов за орбиту Земля – Луна продолжительностью до 1000 сут:

1. Не учитываются следующие подсистемы, так как они одинаковые для всех 4 вариантов СЖО: система вентиляции и регулирования давления; система обнаружения и ликвидации пожара; система очистки атмосферы от микропримесей; оборудование для хранения азота; системы для внекорабельной деятельности; медицинское оборудование; защита от радиации; блок приготовления пищи; душевая установка и другие средства обеспечения бытовых нужд, кроме ассенизационно-санитарного устройства со сбором отходов.

2. Количества потребляемых (кислорода, воды и обезвоженных продуктов питания) и выделяемых (углекислого газа, паров воды, урины и твердых отходов) экипажем веществ равны значениям, принятым в российской космонавтике [5–7].

3. Предполагается, что экипажу для долговременного полета требуется дополнительная санитарно-гигиеническая (СГ) вода в количестве 5,7 кг/чел-сут, включая 0,2 кг/чел-сут воды на личную гигиену. В СЖО на основе запасов веществ СГ вода на все время полета берется в запасах, а отработанная СГ вода собирается в накопителях. В 3 других вариантах СЖО берется начальный запас СГ воды в количестве 5,7 кг/чел и используется система регенерации отработанной СГ воды с коэффициентом извлечения воды 98–99 % [7, 8]. Поэтому для этих вариантов СЖО требуется дополнительный запас СГ воды в количестве 0,1 кг/чел-сут.

4. Часть влаги, выделяемой экипажем, поглощается внутренней обшивкой корабля и модулей. Поэтому для всех вариантов СЖО потребуется дополнительный запас воды в количестве 0,2–0,3 кг/чел-сут [7].

Оценка показателей эквивалентной массы и надежности СЖО

Эквивалентная масса систем жизнеобеспечения

Под эквивалентной массой понимается традиционная суммарная эквивалентная масса СЖО M_{eq}, кг/чел в расчете на 1 члена экипажа:

$$M_{eq} = \left(M_o + mt\right) + a_V\left(V_o + vt\right) + a_N N_{EP} + a_Q Q_{TCS} \quad (1)$$

где M_o, кг/чел – постоянная масса системы, не зависящая от времени работы; m, кг/чел-сут – суммарная масса расходуемых запасов веществ, элементов и блоков на жизнеобеспечение 1 человека в сутки; t, сут – время работы системы; V_o, м^3/чел – постоянный объем системы на 1 человека, включающий объем оборудования СЖО и не зависящий от времени работы; v, м^3/чел-сут – суммарный объем расходуемых запасов веществ, элементов и блоков на жизнеобеспечение 1 человека в сутки; N_{EP}, Вт/чел – среднесуточная мощность потребления электроэнергии на 1 человека; Q_{TCS}, Вт/чел – среднесуточная тепловая мощность, выделяемая в СЖО на 1 человека, включая тепловыделение самого человека; a_V, кг/м^3 – удельная масса гермомодуля, в котором размещена СЖО; a_N, a_Q, кг/Вт – удельная масса энергоустановки (ЭУ) и системы терморегулирования (СТР) с учетом эквивалентной массы гермомодуля, требуемой на их размещение в КА. Приняты следующие значения: a_V = 215,5 кг/м^3, a_N = 0,237 кг/Вт, a_Q = 0,15 кг/Вт [7].

Система жизнеобеспечения на основе запасов веществ состоит из следующих подсистем и блоков: подсистемы сбора конденсата атмосферной влаги; ассенизационно-санитарного устройства со сбором отходов; запасов кислорода в баллонах под давлением, воды в емкостях, обезвоженных продуктов питания в упаковке, поглотителя углекислого газа в емкостях; емкостей-сборников конденсата атмосферной влаги, урины и твердых отходов. Эквивалентная масса этого варианта СЖО, вычисленная по формуле (1), выражается в виде M_{eq} = 68,67 + 14,23·t, кг/чел.

Комбинированная СЖО состоит из подсистем сбора и регенерации конденсата атмосферной влаги с колонками, сбора и концентрации углекислого газа, регенерации СГ воды с колонками; ассенизационно-санитарного устройства со сбором отходов; запасов кислорода в баллонах под давлением, воды в емкостях, обезвоженных продуктов питания в упаковке; емкостей-сборников урины и твердых отходов. Эквивалентная масса такой СЖО выражается в виде M_{eq} = 201,6 + 6,42·t, кг/чел.

Частично замкнутая СЖО состоит из следующих подсистем и блоков: сбора и регенерации конденсата атмосферной влаги с колонками, сбора и концентрации углекислого газа, регенерации СГ воды с колонками, регенерации воды из урины с колонками, генерации кислорода на основе электролиза воды, регенерации углекислого газа в реакторе Сабатье; ассенизационно-санитарного устройства со сбором отходов; запасов воды в емкостях и обезвоженных продуктов питания в упаковке; емкостей-сборников твердых отходов. Эквивалентная масса этой СЖО имеет вид M_{eq} = 453,6 + 2,98·t, кг/чел.

Максимально замкнутая СЖО состоит из следующих подсистем и блоков: сбора и регенерации конденсата атмосферной влаги с колонками, сбора и концентрации углекислого газа, регенерации СГ воды с колонками, регенерации воды из урины с колонками, регенерации углекислого газа на основе его электролиза на оксид углерода и кислород, переработки оксида углерода в углекислый газ и углерод в реакторе Бодуара, частичной генерации кислорода на основе электролиза воды;

ассенизационно-санитарного устройства со сбором отходов; запасов воды в емкостях и обезвоженных продуктов питания в упаковке; емкостей-сборников твердых отходов. Эквивалентная масса этой СЖО имеет вид M_{eq} = 456,8 + 2,56·*t*, кг/чел.

Заметим, что при расчете эквивалентной массы всех вариантов СЖО учитываются все перечисленные подсистемы и блоки, входящие в них. Массоэнергетические и габаритные характеристики всех 4 вариантов СЖО взяты из опубликованных данных [5, 7–13].

Надежность систем жизнеобеспечения

Надежность *R* СЖО определяется через вероятность потери экипажа *Q(LOC)* по причине отказа жизненно важных для экипажа подсистем СЖО: *R* = 1 – *Q(LOC)*. При этом не учитывается вероятность фатальных ошибок экипажа и вероятность отказа обеспечивающих СЖО.

Упрощенная оценка надежности СЖО проводится с учетом следующих допущений:

1. Каждая подсистема, блок (или элемент) могут находиться в одном из 3 состояний: исправном и работающем, резервном или отказавшем. В дальнейшем элементы также будем называть блоками.

2. Время на замену отказавших подсистем и блоков на резервные пренебрежимо мало.

3. Имеем идеальные переключатели на резервные подсистемы и блоки.

4. Нет зависимых между подсистемами и блоками отказов и не может быть отказов подсистем и блоков, находящихся в ненагруженном резерве.

5. Интенсивности отказов λ (отк/сут) подсистем и блоков являются известными постоянными величинами и не зависят от времени полета *t*.

6. Известно, что надежность подсистем и блоков КА подчиняется экспоненциальному закону для вероятности безотказной работы [14, 15]. Тогда вероятность отказа любой подсистемы или блока выражается в виде

$$Q(t) = 1 - exp(-\lambda t) \approx \lambda t,$$

так как λ ≤ 10^{-4} отк/сут, *t* < 1000 сут.

Предполагается, что СЖО каждого варианта состоит из последовательного в смысле надежности соединения жизненно важных подсистем и блоков, так как отказ любой из них приводит к отказу всей СЖО. С учетом того, что требуемая вероятность потери экипажа равна 0,001 << 1, вероятность потери экипажа для *к*-го варианта СЖО *Qk*(ПЭ) вычисляется по следующей формуле:

$$Q_k(LOC) = 1 - \prod_{i=1}^{n_k}\left(1 - Q_{ki}(t)\right) \approx \sum_{i=1}^{n_k} Q_{ki}(t) \approx \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_{ki} t = \lambda_k t, \quad (2)$$

где n_k – количество подсистем в *k*-м варианте СЖО (*к* = 1, …, 4); λ_k – интенсивность отказа *k*-го варианта СЖО; λ_{ki} – интенсивность отказа *i*-й подсистемы в *k*-м варианте СЖО, отказ которой приводит к потере, по крайней мере, 1 члена экипажа. При расчете $Q_k(LOC)$ подсистемы, отказ которых не приводит к потере экипажа, не учитываются.

Интенсивности отказов подсистем λ_{ki} имеют высокую неопределенность, и их значения определялись различными доступными способами:

1) через гарантированный ресурс подсистем из литературных источников [7–13, 16], равный среднему времени T_{ki} между отказами; тогда $\lambda_{ki} = 1/T_{ki}$;

2) по эксплуатационным данным с МКС;

3) для перспективных подсистем – путем расчета через вероятности отказов входящих в них блоков, элементов или их аналогов.

Результаты расчета интенсивностей отказов λ_k и вероятностей потери экипажа $Q_k(LOC)$ по формуле (2) для продолжительности полета *t* = 1000 сут для 4 вариантов СЖО без резервирования, запасных блоков и дополнительных запасов веществ представлены в таблице.

Видно, что требуемый уровень надежности не обеспечивается даже в СЖО на основе запасов веществ, хотя баллоны, емкости и упаковки для запасов веществ имеют высокую исходную надежность при интенсивности отказов порядка 10^{-5}–10^{-7}. Три других варианта СЖО содержат подсистемы регенерации с низкой исходной надежностью с интенсивностями отказов порядка 10^{-3}.

Обеспечение требуемого уровня надежности СЖО

Для увеличения надежности СЖО на основе запасов веществ достаточно ввести запасные баллоны, емкости и упаковки в количестве 10 % от их начального количества [1]. Тогда вероятность отказа $Q1_i$ любой *i*-й подсистемы хранения в баллонах, емкостях или упаковках подчиняется биномиальному закону распределения и выражается в следующем виде:

$$Q_{1i}^{res}(t) = \sum_{l=0}^{m_{1i}-l} \frac{n_{1i}!}{l!(n_{1i}-l)!}\left[\exp(-\lambda_{1i}t)\right]^l \left[\exp(1-\lambda_{1i}t)\right]^{n_{1i}-l}, \quad (3)$$

где λ_{1i} – частота отказа *i*-й подсистемы хранения; m_{1i} – исходное количество баллонов, емкостей или упаковок в *i*-й подсистеме; n_{1i} – количество баллонов, емкостей или упаковок в *i*-й подсистеме с учетом 10 % запаса; *i* = 1, …, n_1.

Тогда вероятность потери экипажа $Q_1^{res}(LOC)$ в СЖО на основе запасов веществ с учетом предложенного способа повышения надежности имеет вид

$$Q_1^{res}(LOC) = \sum_{i=1}^{n_1} Q_{1i}^{res}(t) \cdot \quad (4)$$

Таблица

Вероятности потери экипажа для 4 типовых вариантов СЖО

k	Вариант СЖО	λ_k, отк/сут	$Q_k(LOC) = \lambda_k$ 1000	$Q_k^{res}(LOC)$ за 1000 сут $N_2 = N_3 = N_4 = 4$	$Q_k^{res}(LOC)$ за 1000 сут $N_2 = 4$, $N_3 = N_4 = 5$
1	СЖО на основе запаса веществ	$3{,}75 \cdot 10^{-5}$	0,0375	$0{,}0578 \cdot 10^{-3}$	$0{,}0578 \cdot 10^{-3}$
2	Комбинированная СЖО	$5{,}56 \cdot 10^{-3}$	1	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$
3	Частично замкнутая СЖО	$13{,}7 \cdot 10^{-3}$	1	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	$0{,}0654 \cdot 10^{-3}$
4	Максимально замкнутая СЖО	$16{,}4 \cdot 10^{-3}$	1	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$	$0{,}0774 \cdot 10^{-3}$

В таблице приведено новое значение вероятности отказа Q_1^{res}, рассчитанное по формулам (3) и (4), на 1000 сут для СЖО на основе запасов веществ с учетом 10 % запаса при n_{1i} = 11, m_{1i} = 10 для баллонов с кислородом и емкостей для воды и n_{1i} = 1100, m_{1i} = 1000 для емкостей с адсорбентом углекислого газа и упаковок с обезвоженными ПП.

Повышение надежности 3 других вариантов СЖО обеспечивается 3 способами. Во-первых, увеличивается на 10 % количество баллонов, емкостей и упаковок для запасов веществ. Во-вторых, для малонадежных блоков всех подсистем регенерации вводятся запасные заменяемые блоки, что уменьшает частоту отказов на порядок, но увеличивает эквивалентную массу соответствующих подсистем регенерации на 50 % [1]. В-третьих, для жизненно важных подсистем регенерации, отказ которых приводит к потере экипажа, применяется N_k кратное (k = 2, 3, 4) ненагруженное резервирование, причем (N_k - 1) подсистемы находятся в резерве. Тогда вероятность отказа Q_{ki}^{res} i-й резервированной подсистемы регенерации в k-й СЖО вычисляется по формуле

$$Q_{ki}^{res}(t) = \frac{\left(Q_{ki}^{st}\right)^{N_k}}{N_k!} \text{ ; к = 2, 3, 4,} \qquad (5)$$

где Q_{ki}^{st} – вероятность отказа ki-й подсистемы с учетом 10 % запасов блоков, емкостей и упаковок и введения запасных заменяемых блоков.

Тогда вероятность потери экипажа $Q_k^{res}(LOC)$ в регенерационных СЖО с учетом предложенного подхода для повышения надежности имеет вид

$$Q_k^{res}(LOC) = \sum_{i=1}^{n_k} Q_{ki}^{res}(t) \text{ ; к = 2, 3, 4.} \qquad (6)$$

Для определения минимального требуемого количества N_k резервных подсистем проведены расчеты по формулам (5) и (6) для N_k = 2, 3, 4 и 5; k = 2, 3, 4. Получено, что вероятность потери экипажа $Q_k^{res}(LOC)$ за 1000 сут полета при четырехкратном ненагруженном резервировании не превышает требуемый уровень только для комбинированной СЖО, что показано в таблице в 5-м столбце. При введении пятикратного резервирования ($N_3 = N_4$ = 5) для частично замкнутой СЖО и максимально замкнутой СЖО получаем вероятности потери экипажа, показанные в таблице в последнем столбце. Видно, что полученные вероятности потери экипажа примерно на порядок ниже требуемого значения, что обеспечивает сверхвысокую надежность СЖО за 1000 сут полета.

Анализ показателей надежности и эквивалентной массы СЖО

Введение запасов веществ, запасных блоков и ненагруженного резервирования подсистем регенерации приводит к увеличению эквивалентной массы СЖО. Теперь эквивалентная масса СЖО с учетом выражения (1) вычисляется по следующей формуле:

$$M_{keq} = 1{,}5\left(M_o^{nres} + M_o^{res} N_k\right) + 1{,}1mt +$$

$$+ a_V 1{,}5\left(V_o^{nres} + V_o^{res} N_k\right) + a_V 1{,}1vt + a_N N_{EP} + a_Q Q_{TCS} \text{ , (7)}$$

где M_o^{nres}, V_o^{nres} – не зависящие от времени полета t масса и объем подсистем регенерации, не являющихся жизненно важными для экипажа; M_o^{res}, V_o^{res} – не зависящие от времени полета t масса и объем подсистем регенерации, являющихся жизненно важными для экипажа.

На рис. 1 представлены зависимости эквивалентной массы M_{eq} 4 типовых вариантов СЖО от времени полета в соответствии с формулой (7) и удовлетворяющих требованию по надежности на t = 1000 сут полета при N_2 = 4, $N_3 = N_4$ = 5. Видно, что СЖО на основе запаса веществ выгодна по показателю эквивалентной массы до $t_1 \approx$ 80 сут полета, а применение комбинированной СЖО выгодно до $t_2 \approx$ 300 сут полета. До t_2 сут полета эквивалентные массы частично и максимально замкнутых СЖО примерно равны, а далее при увеличении продолжительности полета максимально замкнутая СЖО обладает меньшей эквивалентной массой.

На диаграмме на рис. 2 показан вклад всех составляющих эквивалентной массы СЖО при t = 1000 сут. Наибольший вклад дают установочная масса СЖО и эквивалентная масса гермомодуля, а

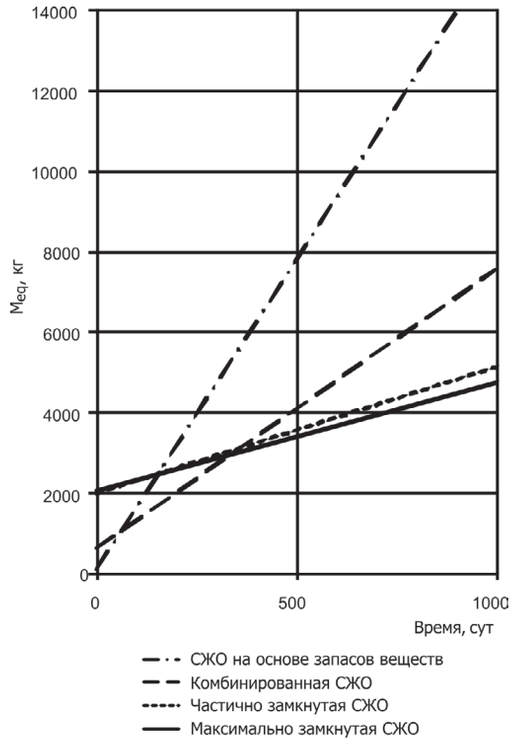

Рис. 1. Зависимости эквивалентной массы типовых вариантов СЖО, удовлетворяющих требованию по надежности, от времени полета

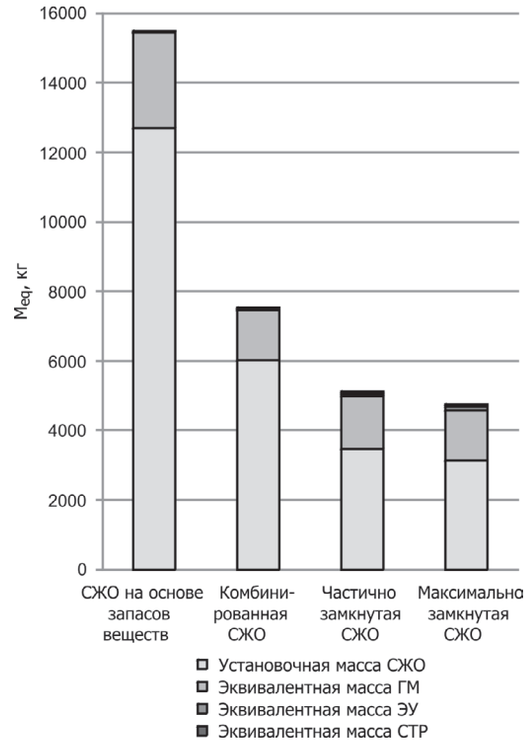

Рис. 2. Вклад составляющих эквивалентной массы типовых вариантов СЖО при t = 1000 сут полета

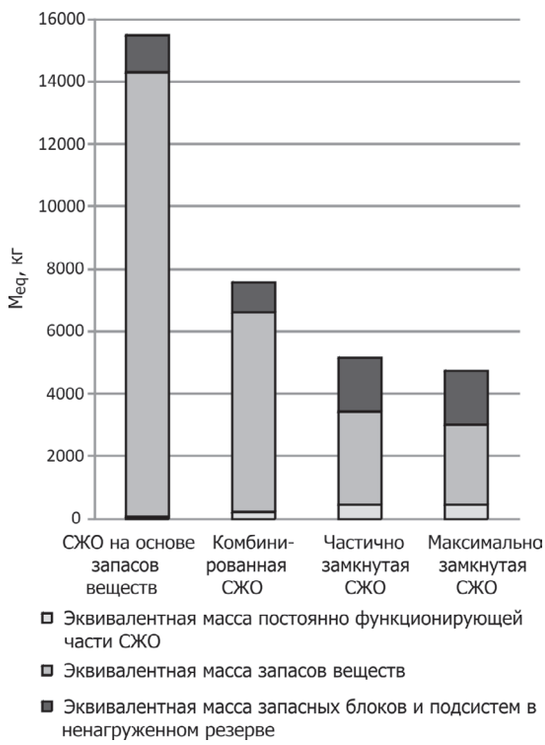

Рис. 3. Вклад запасных подсистем, блоков и веществ в эквивалентную массу типовых вариантов СЖО при t = 1000 сут полета

эквивалентные массы ЭУ и СТР не превышают 2 %. Следует отметить, что учет требований надежности и эквивалентной массы гермомодуля привел к увеличению примерно в 3 раза характерных продолжительностей полета t_1 и t_2 по сравнению с соответствующими значениями, получаемыми без их учета [5].

Представляет интерес разбиение эквивалентной массы СЖО при t = 1000 сут на эквивалентные массы постоянно функционирующей части СЖО, запасов веществ и запасных блоков и подсистем в ненагруженном резерве, представленное на диаграмме на рис. 3. Эквивалентная масса запасных веществ преобладает в СЖО на основе запасов веществ, а ее вклад в M_{eq} регенерационных СЖО тем меньше, чем выше степень замкнутости СЖО. И наоборот, вклад эквивалентной массы запасных блоков и подсистем в ненагруженном резерве тем больше, чем выше степень замкнутости СЖО.

Из проведенных расчетов следует, что при принятых в данной работе условиях из 4 вариантов СЖО, удовлетворяющих заданному требованию по надежности, наименьшей эквивалентной массой обладает максимально замкнутая СЖО при продолжительности полета более 300 сут. Зависимости вероятностей потери экипажа от времени полета для 4 рассматриваемых вариантов СЖО при N_2 = 4, N_3 = N_4 = 5 представлены на рис. 4. Наиболее надежной

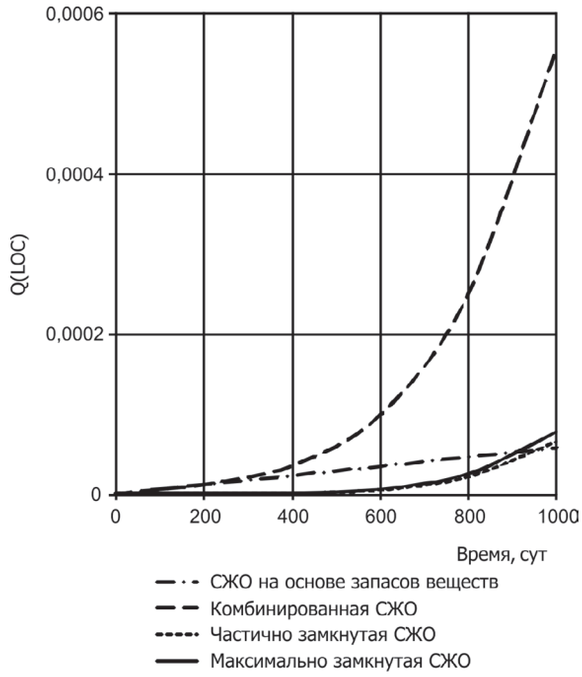

Рис. 4. Зависимости вероятностей потери экипажа от времени полета для 4 вариантов СЖО при $N_2 = 4$, $N_3 = N_4 = 5$

является СЖО на основе запасов веществ, надежность которой при t = 1000 сут на порядок выше, чем требуемая. К 1000 сут полета 3 других варианта СЖО удовлетворяют требованию по надежности, причем, чем выше степень замкнутости СЖО, тем ниже ее надежность. В итоге комбинированная СЖО характеризуется наименьшей вероятностью потери экипажа при t = 1000 сут, но имеет эквивалентную массу на 2000 кг выше, чем другие варианты СЖО с подсистемами регенерации.

Дальнейший анализ показателей надежности показывает, что если удастся увеличить гарантированный ресурс всех подсистем регенерации с 360–370 сут наработки на отказ до 400 сут (что представляется вполне достижимым), то для частично замкнутой и максимально замкнутой СЖО потребуется только четырехкратное резервирование для обеспечения требуемого уровня надежности.

Выводы

1. Проведена оценка показателей надежности и эквивалентной массы 4 типовых вариантов СЖО КА для 1000-суточных автономных космических полетов с использованием надежностных и массоэнергетических характеристик регенерационных подсистем, используемых на МКС и находящихся в стадии разработки в РФ. Показано, что ни один вариант СЖО не обладает требуемой вероятностью потери экипажа, равной 0,001 за 1000 сут полета и требует введения дополнительных запасов веществ, блоков и многократного ненагруженного резервирования подсистем регенерации.

2. Определено, что требуемый уровень надежности СЖО на основе запасов веществ достигается при введении 10 % запасов кислорода, воды, адсорбента углекислого газа и обезвоженных ПП. Для 3 других вариантов СЖО помимо аналогичных 10 % запасов веществ требуется введение запасных заменяемых блоков и многократного ненагруженного резервирования всех жизненно важных подсистем регенерации. Для комбинированной СЖО требуется четырехкратное, а для частично и максимально замкнутых СЖО – пятикратное ненагруженное резервирование. По сравнению с результатами, представленными Jones H.W., требуемая кратность резервирования для СЖО с высокой степенью замкнутости уменьшена с 6 до 5 за счет применения ненагруженного резервирования и использования российских подсистем регенерации воды из конденсата атмосферной влаги и урины с более высоким гарантированным ресурсом.

3. Показано, что при соответствующей доработке всех подсистем регенерации и увеличении их гарантированного ресурса с 360–370 сут наработки на отказ до 400 сут (что представляется вполне допустимым) для частично замкнутой и максимально замкнутой СЖО потребуется только четырехкратное резервирование для обеспечения требуемой надежности.

4. Подтверждено, что чем выше степень замкнутости в СЖО, тем меньше вклад эквивалентной массы запасных веществ и больше вклад эквивалентных масс запасных блоков и подсистем в ненагруженном резерве в суммарную эквивалентную массу системы, что по совокупности приводит к ее уменьшению.

5. Расчеты эквивалентной массы СЖО показали, что вклад в нее эквивалентных масс ЭУ и СТР при 1000 сут полета не превышает 2 %, а вклад эквивалентной массы гермомодуля – значительный и достигает 30 % для частично и максимально замкнутых СЖО, что требует ее обязательного учета при анализе показателей эффективности СЖО.

6. На начальных стадиях проектирования помимо учета показателей эквивалентной массы и надежности следует минимизировать показатель стоимости жизненного цикла СЖО, который для долговременных автономных полетов в дальний космос может стать определяющим для выбора оптимального варианта СЖО.

Список литературы

1. *Jones H.W.* Design and analysis of a flexible, reliable deep space life support system // AIAA-2012-3418, 42nd International conference on environmental systems (ICES), 15–19 July, 2012, San Diego, California.

2. *Lange K.E., Anderson M.S.* Reliability impacts in life support architecture and technology selection // AIAA-2012-3491, 42nd International conference on environmental systems (ICES), 15–19 July, 2012, San Diego, California.

3. *Binder T., Nathanson E., Delz S. et al.* Efficient Evaluation method of system concepts for preliminary ECLSS design studies // ICES-2014-181, 44th International conference on environmental systems (ICES), 13–17 July, 2014, Tucson, Arizona.

4. *Detrell G., Messerschmid E., Griful E. et al.* ECLSS reliability analysis tool for long duration spaceflight // ICES-2016-294, 46th International conference on environmental systems (ICES), 10–14 July, 2016, Vienna, Austria.

5. *Серебряков В.Н.* Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов. М., 1983.

Serebryakov V.N. Basics of the spacecraft life support systems design. Moscow, 1983.

6. *Рожнов В.Ф.* Космические системы жизнеобеспечения. М., 2009.

Rozhnov V.F. Spacecraft life support systems. Moscow, 2009.

7. *Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Курмазенко Э.А.* Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых космических полетов: Предварительный анализ // Вестник Моск. авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 17–24.

Bobe L.S., Gavrilov L.I., Kurmazenko E.A. Development prospects for regenerating life support systems in regard to long-term manned space flights: A preliminary analysis // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2008. V. 15. № 1. P. 17–24.

8. *Сальников Н.А., Бобе Л.С., Кочетков А.А., Синяк Ю.Е.* Регенерация санитарно-гигиенической воды на перспективных космических станциях // Авиакосм. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 5. С. 47–54.

Salnikov N.A., Bobe L.S., Kochetkov A.A., Sinyak Yu.E. Regeneration of sanitary/hygienic water onboard future space stations // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 5. P. 47–54.

9. *Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А. и др.* Проблемы жизнеобеспечения экипажей длительных космических экспедиций // Там же. 2008. Т. 42. № 6–1. С. 13–16.

Romanov S.Yu., Zhelezniakov A.G., Telegin A.A. et al. Problems of life supports for crews on long-duration space missions // Ibid. 2008. V. 42. № 6–1. P. 13–16.

10. *Бобе Л.С., Солоухин В.А., Боровикова Г.С. и др.* Работа системы регенерации воды из конденсата атмосферной влаги СРВ-К2М на Международной космической станции. Перспективы развития // Там же. С. 74–76.

Bobe L.S., Soloukhin V.A., Borovikova G.S. et al. Operation of the system of water reclamation from atmospheric condensate (SRV-R2M) on the international space station: Prospect of development // Ibid. P. 74–76.

11. *Бобе Л.С., Солоухин В.А., Рыхлов Н.В. и др.* Работа системы приема и консервации урины СПК-УМ на Международной космической станции // Там же. С. 86–88.

Bobe L.S., Soloukhin V.A., Rykhlov N.V. et al. Operation of the urine intake and conservation system (SPK-UM) on the International space station // Ibid. P. 86–88.

12. *Гаврилов Л.И., Курмазенко Э.А., Томашпольский М.Ю. и др.* Перспективы создания регенерационных систем обеспечения газового состава для межпланетных полетов // Там же. С. 67–69.

Gavrilov L.I., Kurmazenko E.A., Tomashpolsky M.Yu. et al. Prospect for creation of air regeneration systems for explorations missions // Ibid. P. 67–69.

13. *Климарев С.И., Синяк Ю.Е., Курмазенко Э.А.* Регенерационная система обеспечения газового состава // Там же. 2013. Т. 47. № 2. С. 37–41.

Klimarev S.I., Siniak Yu.E., Kurmazenko E.A. Gaseous content regeneration system // Ibid. 2013. V. 47. № 2. P. 37–41.

14. *Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В.* Совместная оптимизация массоэнергетических характеристик системы терморегулирования космических аппаратов и приборного комплекса при обеспечении требуемой надежности // Вестник Моск. авиационного института. 2009. Т. 16. № 1. С. 5–14.

Kudriavtseva N.S., Malozemov V.V. Joint optimization of mass and power characteristics for spacecraft thermal control system and cooled instruments under specified reliability requirements // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2009. V. 16. № 1. P. 5–14.

15. *Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В.* Космические системы жизнеобеспечения: Основы обеспечения эффективности систем терморегулирования космических аппаратов // Инженерная экология. 2012. № 2. С. 16–36.

Kudryavtseva N.S., Malozemov V.V. Spacecraft life support systems: Basics of the spacecraft thermal control systems effectiveness ensuring // Inzhenernaya ekologiya. 2012. № 2. P. 16–36.

16. Реализованные проекты. Система «Электрон-ВМ» [Электронный ресурс]. URL: http://www.niichimmash.ru/projects/srvk/ (дата обращения: 30.03.18).

Completed projects. «Electron-VM» system [Electronic resource]. URL: http://www.niichimmash.ru/projects/srvk/ (application date: 30.03.18).

Поступила 11.10.2018

ANALYSIS OF RELIABILITY AND EQUIVALENT MASS OF LIFE SUPPORT SYSTEMS FOR REMOTE SPACE MISSIONS

Kudryavtseva N.S.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 5–12

The original approximate assessment of reliability and equivalent mass of standard life support systems (LSS) for a 1000-day autonomous space mission was made based on

the reliability and mass-energy characteristics of the Russian regeneration subsystems onboard the International space station, and under development. LSS reliability is a function of crew loss probability, whereas mass-energy characteristics is a total equivalent mass per a crew member equal to the system launch mass. Four types of physical-chemical LSS varying in the level of closure were assessed: open or using expendable supplies, hybrid, semi-closed and maximum closed. The required reliability of open LSS is achieved by providing 10 % reserves of oxygen, water, carbon oxide absorbent and sublimated food products. In addition to 10% reserves, the other three types of LSS require also spare replacement assemblies and repeated cold redundancy of vital regeneration subsystems. Hybrid LSS requires fourfold while semi- and maximum closed LSS - fivefold cold redundancy. Options for further redundancy reduction and, therefore, decrease of the total equivalent mass without compromising the LSS reliability are considered.

Kew words: life support system, crew loss probability, equivalent mass.

УДК 004.896:681.3.06;519.8;614.8;629.785:338

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕУГРОЖАЮЩИХ СИТУАЦИЙ И ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ, МЕДИЦИНСКИХ И ЭВАКУАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ЛУННОЙ БАЗЕ

Поляков А.В.[1], Усов В.М.[1, 2], Крючков Б.И.[2], Косачев В.Е.[3], Михайлюк М.В.[4], Мотиенко А.И.[5]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская область
[3]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
[4]Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
[5]Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

E-mail: apolyakov@imbp.ru

Перспективные планы освоения Луны включают развертывание обитаемых лунных баз (ОЛБ). Компьютерные модели возможных сценариев спасения, оказания неотложной медицинской помощи и эвакуации могут сыграть важную роль в формировании облика перспективных медико-технических средств, гарантирующих сохранение жизни в опасных для жизни ситуациях на ОЛБ. В статье анализируются медико-технические требования к исследовательскому комплексу компьютерного моделирования для формирования экспертных решений о проведении аварийно-спасательных работ в режиме «виртуального круглого стола».

Ключевые слова: обитаемые лунные базы, жизнеугрожающие ситуации, экстренное оказание медицинской помощи, аварийно-спасательные и эвакуационные мероприятия, исследовательский комплекс компьютерного моделирования, экспертиза аварийных ситуаций в режиме «виртуального круглого стола».

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 13–19.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-13-19

Опыт медицинского обеспечения (МедОб) пилотируемых полетов на многомодульных орбитальных комплексах (ММОК) позволил отработать достаточный арсенал средств, чтобы свести к минимуму риски снижения работоспособности космонавта и обеспечить своевременную медицинскую помощь экипажу. В частности, на Международной космической станции (МКС) при развитии нештатных ситуаций (НшС), следствием которых могут быть острые нарушения состояния здоровья космонавтов, предусмотрены схемы экстренного завершения полета и экстренной транспортировки космонавтов в медицинские учреждения после приземления. Новый этап развития космических проектов освоения Луны требует изучения медицинских НшС на обитаемых лунных базах (ОЛБ), когда речь идет о нарушениях функций жизненно важных систем организма при прямом патогенном действии техногенных факторов аварий.

Применяемый комплекс медико-технических средств должен гарантировать спасение членов экипажа, оказание им медицинской помощи и эвакуацию из ОЛБ. В этой связи выявляется потребность раннего привлечения к экспертизе построения МедОб заинтересованных специалистов ряда смежных профессий (инженеров, врачей, психологов, эргономистов, авариологов и др.). В этом отношении перспективно использование технологий информационной поддержки, предполагающих формирование экспертных заключений группой специалистов в режиме «виртуального круглого стола» (ВКС), чтобы промоделировать разные сценарии аварий и ликвидации их последствий.

Целью проводимого исследования является систематизация вопросов компьютерного моделирования медицинских НшС на ОЛБ, когда экипаж будет должен самостоятельно бороться за живучесть обитаемого объекта, выполнять спасательные работы, экстренные и неотложные мероприятия медицинской помощи, а также эвакуацию пострадавших.

Концепция применения исследовательского комплекса компьютерного моделирования (ИККМ) для планирования аварийно-спасательных, медицинских и эвакуационных мероприятий в жизнеугрожающих ситуациях на ОЛБ

Методологические основы построения ИККМ и основные задачи применения для построения МедОб применительно к условиям аварийной ситуации на ОЛБ

Успехи и достижения в области IT-технологий дают весомые аргументы в пользу компьютерного

имитационного моделирования, когда натурное моделирование опасных ситуаций с участием человека-испытателя, исходя из соображений безопасности, допускается в исключительных случаях. Имитационная модель должна создаваться, в частности, для проведения модельных цифровых экспериментов по выявлению «узких мест» в проектируемых гермообъектах обитания человека, связанных с рисками для жизни и здоровья. Это достигается применением средств информационной поддержки экспертных групп специалистов разных предметных областей, позволяющих представить в форме динамических визуальных сцен результаты планирования операций и применяемых средств, что отвечает современным тенденциям визуализации научных экспериментов. Отобранные экспертами варианты должны составить основу рекомендаций для построения МедОБ, а также в определенной степени повлиять через систему профессиональной подготовки на адекватность принятия решений экипажем в реальных условиях. Имитационная модель позволяет продемонстрировать последствия нерационально сконфигурированного набора средств защиты и спасения у экипажа, поскольку у экипажа при аварии могут быть серьезно ограничены возможности спасения и эвакуации, а это самым тесным образом связано с учетом «человеческого фактора» в обеспечении безопасности полетов.

Состав модулей ИККМ и назначение информационного обеспечения при моделировании жизнеугрожающих ситуаций на ОЛБ

В числе основных модулей ИККМ принято рассматривать [1, 2]:

– моделирование и визуализацию рабочей среды;

– разработку цифровых моделей поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (ЧС);

– реализацию режима ВКС для группы экспертов;

– построение интерфейсов, позволяющих человеку-оператору (ЧО) в реальном времени взаимодействовать с интерактивной искусственной средой.

Одно из первых естественных требований к информационному обеспечению для оценки условий жизнедеятельности в ОЛБ – провести моделирование и визуализацию рабочей среды таким образом, чтобы сделать акцент на реализацию компонентов принятия решений, связанных с ведением пространственной ориентировки. Это позволяет создать участникам имитационного эксперимента условия для формирования образных представлений о топологии гермообъекта, что важно в вариантах обеспечения эвакуации. Для выполнения моделирования визуальной обстановки на основе технологий виртуальной и дополненной реальности имеется много зарубежных и отечественных разработок [1]. Современная система моделирования и визуализации имеет сложную структуру, что можно видеть на примере GLView (разработка НИИСИ РАН) [2].

На пути достижения высокой реалистичности моделирования имеется немало трудностей. Наибольшие из них связаны с воспроизведением активности мобильных агентов – аватаров, которые имитируют действия ЧО. Эти искусственные агенты функционируют как в автономном режиме, так и по командам ЧО [3]. Проблемным остается вопрос: какие способы локальной навигации и идентификации местоположения объектов будут применяться на ОЛБ? Это важно для имитации перемещений по отсекам ОЛБ не только аватаров космонавтов, но и цифровых моделей аварийно-спасательных роботов (АСР). Наиболее вероятный вариант – применение электронных карт для позиционирования и навигации как на лунной поверхности, так и внутри ОЛБ. Относительно вопросов определения месторасположения и идентификации медицинского имущества и препаратов, как одно из возможных решений, предложено рассматривать технологии RFID-меток [4].

Дополнительно следует отметить, что при моделировании НшС необходимо предусматривать такие негативные для выживания космонавтов варианты обстановки, как потеря зрительного контакта ЧО с рабочей средой, например, при полном отсутствии освещения (при разрушении сети электропитания), сильном задымлении помещения, возникших нарушениях со стороны зрительного анализатора ЧО при действии токсических продуктов (горения). Одно из перспективных решений – привлечь в помощь космонавту АСР, в данном контексте в качестве «робота-поводыря», способного воспринимать голосовые команды ЧО, а при необходимости обеспечивать транспортировку (перенос) пострадавшего члена экипажа в «зону безопасности».

Следующий компонент информационного обеспечения – цифровые модели поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (ЧС). В большей степени они относятся к сфере ответственности инженеров проекта ОЛБ и специалистов-спасателей, но в итоговой форме знаний, систематизированные по градациям риска для жизни и здоровья космонавтов, будут необходимы для формирования медико-психологических рекомендаций по экстренному реагированию на аварию и принятие решения на спасение и эвакуацию членов экипажа. Это требует наличия в симуляторе соответствующих моделей факторов поражения, адаптированных к прогнозу риска здоровью [5], что необходимо для режима ВКС.

Такой компонент информационного обеспечения, как ВКС, должен обеспечивать возможность организации совместной работы экспертной группы над проектом [6].

Для изучения последствий аварий требуется целый ряд исходных данных в виде:

– сценария, который раскрывает общий замысел построения модели НшС и возможных опасных для космонавтов последствий аварии;

– топографической модели станции и задания переходов между ними, особенностей изоляции отсеков, наличие задраиваемых люков, шлюзовых камер, выходов на поверхность Луны, что в целом отражает возможные пути эвакуации;

– схемы размещения оборудования и подручных средств для локализации НшС, спасательного оборудования и защитного снаряжения по ходу расположения путей эвакуации, расположение компонентов системы жизнеобеспечения (СОЖ), расположение датчиков и сигнализаторов для обнаружения и локализации НшС;

– местоположения защитной «медицинской зоны безопасности» (МЗБ) как изолированного отсека, оборудованного автономной СОЖ, хранилищем предметов спецснаряжения и медицинского имущества. Это помещение должно иметь автономный выход на поверхность Луны через шлюзовую камеру, наряду со штатно используемой при отсутствии НшС и факторов ЧС;

– местоположения потенциальной НшС и связанными с ней факторами опасности и видами патогенного воздействия на организм – «местоположения очага опасности» (МПОО), что сопровождается заданием вида и масштаба аварии, критического времени пребывания человека без защитного снаряжения в очаге действия факторов поражения, в зависимости от которого наступает потеря работоспособности или терминальный исход;

– исходного местоположения виртуальных моделей членов экипажа и виртуальных моделей АСР с привязкой к локальной системе координат и электронной карте.

Для обеспечения принятия коллективных решений в ряде публикаций предлагается применение мультиагентных систем (МАС) [7–10]. Основа данной концепции – использование понятия «интеллектуальных агентов». Интеллектуальные агенты могут создаваться для всех участников ВКС (руководителей, операторов и специалистов-экспертов). Они реализуются в виде программ, способных действовать для достижения определенной цели в условиях заданных ограничений и взаимодействовать друг с другом путем обмена сообщениями в форме «переговоров». Это позволяет искать приемлемые для всех участников экспертизы варианты и достигать консенсуса при наличии исходных противоречий у экспертов.

Использование опыта моделирования НшС на ММОС

Полеты на ММОС дали огромный опыт проектирования средств спасения космонавтов и разработки алгоритмов практических действий по обнаружению НшС, предотвращению их перерастания в аварийные ситуации и проведению спасательно-эвакуационных мероприятий в жизнеугрожающей обстановке. Применяемые в составе наземных и бортовых тренажеров сценарии для отработки действий экипажа при НшС на МКС исходят из того, что отработка действий при моделировании различных НшС – важное направление тренировок для лиц, принимающих решения (ЛПР) при высоком риске и развитии аварийных ситуаций на ММОС [11–19]. В этих работах имеются данные об основных сценариях аварийных ситуаций на МКС и о соответствующих стратегиях реагирования на них, а также особо отмечается необходимость выделения в особую группу способов реагирования членов экипажей на НшС медицинского характера.

Наиболее часто в анализ негативных последствий НшС в гермообъекте включаются следующие факторы поражения: ожоги при пожаре, интоксикация продуктами горения, задымление атмосферы, токсичные продукты горения, утечка газов и пр. Из авиационных факторов: взрывная декомпрессия, острая гипоксия, внезапная остановка сердечной деятельности и дыхания при травмах и стрессе.

В работе [13] сосредоточено внимание на 3 основных типах аварий, сопровождающихся действием на организм человека патогенных поражающих факторов: пожар, разгерметизация, загрязнение искусственной атмосферы токсическими продуктами. Пожар несет непосредственные угрозы жизни экипажа вследствие возникновения глубоких ожогов и высокого риска развития ожогового шока. Разгерметизация, вызванная, например, ударом микрометеорита, может привести к перфорации корпуса станции и к расстройствам по типу острой гипоксии, взрывной декомрессии и/или острым декомпрессионным расстройствам. Выделение токсичных веществ может привести к расстройствам системы внешнего дыхания.

С прагматической точки зрения моделирование процессов распространения поражающего фактора и эвакуации людей из зоны поражения можно рассматривать с учетом определения тех временных рамок, которые гарантируют безопасную эвакуацию космонавтов при аварии, а в случае поражения – своевременное проведение неотложных мероприятий по спасению и сохранению жизненно важных функций организма. В этом смысле ключевая задача – понять, как сконфигурировать пути эвакуации и спасения. Дополнительная задача – определить, где рационально расположить пункты хранения имущества и оборудования для применения при аварии (средства пожаротушения, защитные костюмы и маски, медицинское имущество, дислокация АСР и др.).

Выбор схемы оказания медицинской помощи и медицинской эвакуации на ОЛБ

В первой фазе эвакуации в случае возникновения жизнеугрожающей ситуации на ОЛБ у пострадавшего в аварии космонавта необходимо выявить показания к экстренной помощи, исключить воздействие патогенного агента и выполнить реанимацию, если выявлена остановка сердечной деятельности и/или дыхания, или если развился травматический шок. Без реализации этого перечня говорить об эффективности дальнейших мероприятий по оказанию медицинской помощи космонавту не приходится. Медицинская помощь пострадавшим после их доставки в МЗБ должна быть направлена на проведение мероприятий неотложной помощи по жизненным показаниям и подготовку пострадавших к дальнейшей эвакуации на Землю. Первая помощь пострадавшим в экстремальных условиях на ОЛБ, вероятно, будет необходима при таких угрожающих жизни и здоровью состояниях, как травмы, кровотечения, ожоги, отравления, остановка дыхания и кровообращения и др. При этом основными мероприятиями первой помощи будут следующие:

– устранение действия травмирующего фактора (извлечение и вынос пострадавшего из опасной зоны, тушение одежды, механическое удаление ядов с открытых участков кожи и т.д.);
– проведение базовой СЛР;
– временная остановка наружного кровотечения;
– наложение асептической повязки на раны и ожоги, окклюзионной повязки при пневмотораксе;
– обеспечение транспортной иммобилизации;
– создание безопасных условий и контроль состояния пострадавшего и др.

Расширенные требования к оборудованию, медикаментам и медицинскому имуществу в составе индивидуальных пакетов и медицинских укладок в «медицинской зоне безопасности» ОЛБ в значительной степени сводятся к предложениям о выделении набора именно для экстренного применения в случае аварии. При этом каждая специализированная укладка должна отвечать следующим требованиям: минимальная достаточность медицинского имущества для оказания данного вида помощи, простота и оперативность поиска и применения средств для сохранения жизненно важных функций организма пострадавшего.

Наиболее исследованной является задача построения маршрутов эвакуации из зданий и помещений при пожаре в соответствии с высоким риском возникновения пожара и тяжестью его последствий. В общем случае модель эвакуации предназначается для предсказания времени, необходимого для эвакуации людей из горящего помещения. Этот тип моделей может использоваться для поддержки принятия решений при эвакуации космонавтов, а также и для верификации плана помещения и плана эвакуации при пожаре.

В планируемых проектах освоения Луны предусматривается применение различных робототехнических систем (РТС). При многих аварийных ситуациях применение АСР может оказаться единственным видом помощи экипажу в автономных условиях на ОЛБ.

Правильное и своевременное реагирование экипажа на НшС, перерастающую в аварийную и несущую угрозы жизни и здоровью ситуацию, может быть обеспечено целым комплексом подготовительных мероприятий, главным из которых является обученность космонавтов к экстренному реагированию, включающая:

– их способность сохранять самообладание (стрессоустойчивость) и не допускать импульсивных поступков;
– слаженность взаимодействия при реализации принятого решения на устранение НшС;
– понимание назначения и показаний на применение средств защиты и/или спасение;
– умение оказывать неотложную помощь по показаниям;
– четкое ведение коммуникации и др.

Не меньшее значение имеет фактор полноценного проектирования условий деятельности экипажа в аварийной обстановке, поскольку качество подготовки и принятия решений при снижении информационной поддержки с Земли, прежде всего, зависит от того, насколько продуман состав средств защиты организма, имеется ли возможность эвакуации с учетом локализации очага аварии и помещения для безопасного пребывания в период экстремально высоких значений поражающих факторов, обеспечены ли условия быстрого развертывания медицинских средств оказания экстренной помощи и подготовки к эвакуации и др. В самом неблагоприятном варианте у космонавтов может не оказаться достаточного резерва времени на спасение, если не предусмотрены пути эвакуации и средства защиты от экстремальных поражающих факторов аварии.

Совокупность перечисленных выше вопросов требует применения такой методологии, когда экспертная группа в предварительном режиме может проверить конкурирующие проектные варианты организации деятельности экипажа по проведению аварийно-спасательных и эвакуационных мероприятий в формате цифровой имитации и визуализации последовательности разворачивающихся событий с учетом всех факторов, способных повлиять на исход аварийной ситуации. В такой постановке получаемый в ходе имитационного моделирования опыт проектирования сценариев МедОб может составить основу для разработки рекомендаций экипажу для деятельности в автономном режиме. Основная цель такого анализа – найти ресурсы для снижения угроз

для жизни, что является критическим фактором эффективности МедОб.

В данной работе предпринята попытка определить предварительные требования к ИККМ и очертить круг сценариев, которые могут быть изучены в интерактивном режиме и наглядно визуализированы. Разбор допущенных ошибок участников компьютерного эксперимента при анализе различных сценариев должен показать причины неблагоприятных последствий аварии и возможные пути противодействия поражающим факторам.

Проведенное исследование определило необходимые предпосылки для построения ИККМ, существенно расширяющего возможности имитационного моделирования в интересах совершенствования системы МедОб в перспективных космических проектах.

Выводы

1. Возможность своевременного спасения, эвакуации из очага поражающего действия факторов аварийной ситуации и оказания экстренной медицинской помощи пострадавшему космонавту лежит в основе обеспечения безопасности пилотируемых программ освоения космоса и составляет область компетенции и ответственности врачей. Опираясь на достигнутый уровень безопасности полетов и качества медицинского обеспечения на МКС, важно предусмотреть в перспективных проектах освоения Луны преемственность опыта МедОб экипажу и повысить готовность самого экипажа адекватно реагировать на потенциально опасные для жизни и здоровья аварийные ситуации.

2. Для исследования сложной междисциплинарной проблемы совершенствования методов и средств обеспечения безопасности экипажа при освоении Луны в дополнение к затратным и сложным в реализации натурным методам эксперимента с участием испытателей-добровольцев предлагается использовать модели имитационного моделирования. Данные модели позволят изучать варианты развития аварийных ситуаций, последствия действия поражающих факторов, и принятия рациональных решений о спасении пострадавших, оказания им экстренной медицинской помощи и медицинской эвакуации.

3. При выборе способов спасения и путей эвакуации космонавта при НшС на ОЛБ необходимо конкретизировать состав тех рисков и угроз, которые непосредственно вытекают из характера решаемых задач, характеристик средств защиты организма и средств обеспечения жизнедеятельности, а также располагаемых средств спасения, резерва времени на проведение эвакуационных мероприятий.

4. Робототехническая поддержка экипажа в условиях автономной работы на Луне должна рассматриваться как составная часть МедОб, так как многие виды спасательных, реанимационных и эвакуационных работ в условиях автономности могут выполняться не только силами экипажа, но и с поддержкой АСР.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0130-2014-0006, тема 65.1 (№ госрегистрации 01201370667).

Список литературы

1. Девятый Международный аэрокосмический конгресс IAC'18: Тезисы докладов. 28–31 августа 2018 г., Москва, Россия. [Электронный ресурс]. URL: http://www.fund.ru/rus/programs/iac/iac-2018.shtml (дата обращения: 08.09.2018).

9th International aerospace congress IAC'18: Abstract of reports. 28–31 Aug. 2018, Moscow, Russia. [Electronic resource]. URL: http://www.fund.ru/rus/programs/iac/iac-2018.shtml (application date: 08.09.2018).

2. *Михайлюк М.В., Торгашев М.А.* Система GLView визуализации для моделирующих комплексов и систем виртуальной реальности // Вестник РАЕН. 2011. Т. 11. № 2. С. 20–28.

Mikhaylyuk M.V., Torgashev M.A. The visualization system GLView for modeling complexes and systems of virtual reality // Vestnik RAEN. 2011. V. 11. № 2. P. 20–28.

3. *Karpov A.A., Mikhaylyuk M.V., Usov V.M., Kryuchkov B.I.* Virtual prototyping of Human-Machine Interaction for remote control of space autonomous manipulation robots based on augmented reality technology // IAC2016. Paper number IAC-16,B3,6-A5.3,7,x34571 URL: https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-16/B3/6-A5.3/34571/ (application date: 21.01.2018).

4. *Поляков А.В., Дашевский В.П., Карпов А.А. и др.* Применение RFID-технологий для информационной поддержки космонавтов на борту пилотируемого комплекса при использовании медицинских укладок и аптечек // Пилотируемые полеты в космос. 2016. № 1 (18). С. 104–117.

Polyakov A.V., Dashevsky V.P., Karpov A.A. et al. Application of RFID-technology for information support of cosmonauts on-board of manned aircraft when using medical setups and first aid kits // Pilotiruemye polety v kosmos. 2016. № 1 (18). P. 104–117.

5. *Переведенцев О.В., Орлов О.И., Леванов В.М.* К вопросу о разработке интеллектуальных компонентов системы поддержки принятия решения для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых космических полетов // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 4. С. 24–27.

Perevedentsev O.V., Orlov O.I., Levanov V.M. On the development of intelligent components of the decision support system for medical care in interplanetary manned space flights // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 4. P. 24–27.

6. *Диязитдинова А.Р., Иващенко А.В., Скобелев П.О.* Автоматизированная поддержка принятия коллективных решений на основе организации виртуального круглого

стола // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 4. С. 67–75.

Diyazitdinova A.R., Ivashchenko A.V., Skobelev P.O. Automated support for collective decision-making through the organization of virtual round table // Infokommunikatsionnye tekhologii. 2008. V. 6. № 4. P. 67–75.

7. *Лахин О.И., Симонова Е.В., Скобелев П.О. и др.* Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки процессов технического обслуживания и ремонта при эксплуатации изделий аэрокосмической промышленности // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4. С. 10–16.

Lakhin O.I., Simonova E.V., Skobelev P.O. et al. Origin approach to the development of an intelligent support system's prototype for the processes of maintenance and repair in the operation of products the aerospace industry // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2015. № 4. P. 10–16.

8. *Лахин О.И., Скобелев П.О., Симонова Е.В.* Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий // Там же. 2015. № 2 (75). С. 43–48.

Lakhin O.I., Skobelev P.O., Simonova E.V. The approach to the development of an intelligent system's prototype of to support the adoption of coordinated decisions in the design of small spacecraft based on multi-agent technologies // Ibid. 2015. № 2 (75). P. 43–48.

9. *Диязитдинова А.Р., Иващенко А.В., Симонова Е.В. и др.* Концепция мультиагентной системы интерактивного построения программы полета и планирования грузопотока Международной космической станции // Труды XI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (23–25 июня 2010 г.). Самара, С. 608–614.

Diyazitdinova A.R., Ivashchenko A.V., Simonova E.V. et al. The concept of a multi-agent interactive program for constructing a flight program and cargo planning for the International space station // Proceedings of the XI International conference «Control and simulation problems in complex systems» (June 23–25, 2010). Samara, P. 608–614.

10. *Матюшин М.М., Вакурина Т.Г., Котеля В.В. и др.* Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 9–17.

Matyushin M.M., Vakurina T.G., Kotelya V.V. et al. Methods and tools for the construction of ontologies for visualization of related information objects of arbitrary nature in complex information and analytical systems // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2014. № 2 (69). P. 9–17.

11. *Бронников С.В., Рожкова И.А.* Тренажер аварийных ситуаций // Доклад на XLIV научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (15–17 сентября, 2009). Калуга, С. 100–101.

Bronnikov S.V., Rozhkova I.A. Emergency simulator // Report at the XLIV scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky (September 15–17, 2009). Kaluga, P. 100–101.

12. *Бронников С.В., Маликов А.Е., Рожкова И.А.* Подготовка космонавтов к действиям в аварийных ситуациях на космической станции // Пилотируемые полеты в космос. 2018. № 2 (27). С. 35–45.

Bronnikov S.V., Malikov A.E., Rozhkov I.A. Cosmonauts' training for the actions in emergency situations on a space station // Pilotiruemye polety v kosmos. 2018. № 2 (27). P. 35–45.

13. *Uhlig Th., Roshani Fr.-C., Amodio C. et al.* ISS emergency scenarios and a virtual training simulator for flight controllers // Acta Astronaut. 2016. V. 128. P. 513–520. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.08.001.

14. *Di-Ping Yuan, Ming-Jun Wu, Li-Biao Pan* Design and implementation of virtual training scenario editing system of emergency disposal // 7th International conference on intelligent computation technology and automation (25–26 Oct., 2014). P. 174–177. DOI: 10.1109/ICICTA.2014.49.

15. *Рожкова И.А., Смирнова О.В.* Направления дальнейшего развития методического и технического обеспечения подготовки экипажей к действию в аварийных ситуациях // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 2 (71). С. 139–146.

Rozhkova I.A., Smirnova O.V. The directions of further development of the methodical and technical support of crew training for action in emergency situations // Kosmonavtika raketostroenie. 2013. № 2 (71). P. 139–146.

16. *Kuch T., Sabath D.* The Columbus-CC – operating the European laboratory at ISS // Acta Astronaut. 2008. V. 63. P. 204–212.

17. *Харламов М.М., Ковригин С.Н., Курицын А.А.* Использование информационных технологий в процессе подготовки космонавтов. // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 1 (6). С. 35–43.

Kharlamov M.M., Kuritsyn A.A., Kovrigin S.N. The use of information technologies in the process of cosmonauts' training // Pilotiruemye polety v kosmos.. 2013. № 1 (6). P. 35–43.

18. *Курицын А.А., Крючков Б.И.* Особенности управления технологическим процессом подготовки экипажей современных орбитальных пилотируемых комплексов. // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 9116–9125.

Kuritsyn A.A., Kryuchkov B.I. The features of the technological process control of crews' training for modern orbital manned complexes // XII All-Russian meeting on the problems of management of the all-union service Alert-2014. V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of RAS. 2014. P. 9116–9125.

19. *Kuritsyn A.A., Krikalyov S.K., Sokhin I.G.* Organization of the ISS crew training and further development of cosmonaut training system // 62nd International astronautical congress. 2011. Cape Town, South Africa. IAC Paper. IAC-11.B3.5.7.

Поступила 22.10.2018

COMPUTER SIMULATION OF LIFE-THREATENING SITUATIONS AND RESCUE, MEDICAL AND EVACUATION ACTIVITIES ON A LUNAR BASE

Polyakov A.V., Usov V.M., Kryuchkov B.I., Kosachev V.E., Mikhailyuk M.V., Motienko A.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 13–19

Ambitious plans of the Moon exploration comprise construction of habitable lunar bases (HLB). Computer simulation of conceivable scenarios of rescuing, on-site medical assistance and evacuation can contribute immensely to maturation of the medical rescue technologies in life threatening situations on HLB. The paper analyzes the medical-engineering requirements for the development of a computer simulation system to support decision making in the shape of virtual roundtables.

Key words: habitable lunar base, life-threatening situations, emergency aid, rescue and evacuation, computer simulation system, virtual roundtable discussions of emergency.

УДК 53.083.7+615.47:616-072.7

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Вассерман Е.Л.[1, 2, 3], Денисова Д.М.[1], Рудницкий С.Б.[1]

[1]Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
[2]Санкт-Петербургский государственный университет
[3]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

E-mail: ewasser@ev7987.spb.edu

В систематическом обзоре открытых научных публикаций за 2012–2018 гг. продемонстрированы современные технические возможности и сформулированы основные методические принципы дистанционной бесконтактной диагностики функционального состояния человека. Описан ряд общих тенденций, наблюдаемых в этом технологическом направлении в последние годы. Выделены технические и методические решения, обеспечивающие относительно лучшие с точки зрения качества измерений характеристики, сложности их организации, разнообразия регистрируемых физиологических показателей и др. Отмечен дефицит работ, в которых описываются использование химических датчиков, мультимодальные измерения, комплексирование датчиков и применение методов регуляризации. При этом узкими местами остаются робастность получаемых оценок при измерениях в реальных условиях и точность вторичных показателей. Наибольшее разнообразие определяемых физиологических показателей обеспечивают локационные методы, термография и регистрация речи. Наиболее устойчивыми к факторам среды измерения оказываются локационные методы: радиолокация и ультразвуковая локация. Наименьшую организационную сложность измерений, как правило, обеспечивают методы, использующие видеокамеры.

Ключевые слова: функциональное состояние, бесконтактные измерения, дистанционная диагностика.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 20–32.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-20-32

Накопленные знания о функционировании человека позволяют говорить о том, что эффективными с точки зрения здравоохранения, экономики и обеспечения безопасности оказываются не только своевременная диагностика расстройств его здоровья (одно из основных правил медицины), но и диагностика его функционального состояния (ФС) вообще. Примеров тому множество: оценивание ФС представителей профессий с повышенным риском травм или тяжелых последствий ошибочного решения, донозологическая диагностика в группах риска, обоснование выбора методов лечения или реабилитации больных, профессиональный отбор, оптимизация рабочей или учебной нагрузки, прогнозирование агрессивного поведения и т.д.

В отличие от заболеваний (или шире – расстройств), современные парадигмы которых предполагают дискретность и использование закрытых перечней диагнозов, ФС континуальны и могут диагностироваться с использованием ранговых или даже более сильных шкал. Применительно к ФС возможным оказывается и более свободное манипулирование результатами диагностики в процессе вторичной их обработки: из ФС отдельных органов и систем складывается сложный паттерн ФС организма [1]. При этом возможно использование разных моделей ФС; эффективной может оказаться их комбинация [2].

Между тем все возрастающая сложность рабочей, учебной и бытовой среды, высокие требования к сохранению комфорта для пациента (испытуемого) и его работоспособности во время исследования, иногда – необходимость сокрытия факта наблюдения за ним делают желательным (или даже необходимым) использование дистанционных бесконтактных (т.е. без прямого или опосредованного механического контакта датчика с испытуемым) методов диагностики. При этом единства взглядов и подходов к разработке систем бесконтактной диагностики, методов бесконтактного измерения физиологических и психофизиологических показателей человека и мониторинга его ФС в настоящее время нет. Это вызвано, с одной стороны, сложностью человека и исследуемых процессов, с другой — настолько бурным развитием новых технологий, что последние существенно опережают методическое обеспечение их прикладного использования [2].

Наиболее трудными задачами, которые приходится решать в процессе разработки и создания такого рода систем, представляются следующие:

1. Разработка гибкого аппаратно-программного комплекса с унифицированным интерфейсом, позволяющим интегрировать его в различные системы сбора и обработки диагностической информации, в том числе – медицинские киберфизические системы [3, 4].
2. Теоретическое обоснование и экспериментальная проверка набора измеряемых показателей и измерительных приборов для эффективного сбора данных и мониторинга ФС в зависимости от конкретных диагностических задач.
3. Техническое обеспечение совместной эксплуатации и синхронного сбора данных всех используемых приборов, в том числе вне специально оборудованных помещений.
4. Обеспечение свободы перемещения и комфорта пациентов (испытуемых) во время мониторинга.
5. Организация оперативного распознавания значимых изменений ФС с передачей этой информации в центр принятия решений.

Если с решением этих задач удается справиться, то открываются широкие перспективы для использования систем бесконтактного измерения физиологических показателей человека в самых разных областях. К последним относятся:

– телемедицинская скрининговая и экспресс-диагностика;
– экспресс-диагностика в медицинской организации;
– индивидуальная экспресс-диагностика;
– биологические и медицинские научные исследования;
– организация биологической обратной связи в лечебно-тренирующих системах;
– организация биологической обратной связи в тренажерных комплексах операторов сложных систем;
– мониторинг ФС операторов сложных систем в процессе их работы;
– скрытое наблюдение в процессе оперативной работы спецслужб;
– вероятностное определение эмоционального состояния и намерений людей из определенных групп (например, при прохождении таможенного и/или паспортного контроля) и др.

Дальнейшее развитие и применение методов и систем бесконтактного измерения физиологических показателей человека, как нам представляется, будет тесно связано (а потом и интегрировано) с двумя технологическими направлениями, задающими мировые тренды последних лет в этой технологической области: медицинскими киберфизическими системами (МКФС) и биотехническими системами (БТС).

Киберфизические системы характеризуются высоконадежными аппаратными и программными средствами автоматизации, обеспечивающими гибкость и многозадачность всего комплекса без прямого вмешательства пользователя-оператора. На сегодняшний день МКФС являются жизненно важными, контекстно-ориентированными, сетевыми системами медицинских устройств [5].

БТС (появившиеся еще на заре развития техники, когда впервые человек и используемые им технические средства приобрели новые, недостижимые до того свойства) на современном этапе развития демонстрируют смену ролей, отводимых человеку и технике. Если раньше техническая часть БТС лишь дополняла биологическую (представленную человеком), то сейчас она зачастую выполняет все основные функции, в то время как человек только контролирует процесс, вмешиваясь в него при необходимости. Более того, биологической частью БТС может быть не только человек, но и другое животное или вообще любой живой организм. В последнем случае происходит еще одно перераспределение ролей: человек может оказаться лишь пользователем, потребителем того, что производит система биологических и технических компонентов.

Учитывая вышеизложенное, целью проведенного нами обзора стали демонстрация современных технических возможностей и формулирование основных методических принципов бесконтактной диагностики ФС человека. Материалом для обзора послужили открытые научные публикации за 2012–2018 гг.

Характеристики методов и систем

Для последующего сравнительного анализа нами был выделен ряд характеристик рассматриваемых методов и систем. Эти характеристики можно разделить на несколько групп: физиологические, метрологические, методические, технические, информационные и экономические. Однако такое разделение весьма условно, и группы пересекаются; прежде всего, это касается технических особенностей используемой аппаратуры и общей логики получения диагностически ценной информации. Первые выходят за рамки обзора, вторые рассматривать в отрыве от способов и методик измерения представляется нецелесообразным. Детализация описания тех или иных характеристик определялась заявленной целью обзора.

Физиологические характеристики

Конечной целью использования любой из рассматриваемых нами систем является получение информации о функционировании объекта исследования – человека. Человек представляет собой «очень сложную вероятностную систему» [6] и демонстрирует чрезвычайную сложность поведения вследствие как сложности собственной структуры,

так и сложности воспринимаемой им среды, в условиях воздействия которой он функционирует [7, 8]. На сегодняшний день лишь небольшое число показателей функционирования человека можно оценивать бесконтактно, поэтому именно они в первую очередь подлежат указанию при описании любого диагностического метода.

Мы предлагаем различать подлежащий непосредственному изучению физиологический процесс и физиологическую и/или клиническую трактовку полученных результатов. И то и другое описывается в терминах соответствующей предметной области, т.е. физиологии и медицины. Однако трактовка результатов предполагает использование доступной контекстной информации и реализуется специалистом-экспертом или искусственной системой поддержки принятия решения в ходе вторичной (а иногда и третичной и даже более высокого порядка) обработки данных.

Поскольку существующие технические системы бесконтактной диагностики не позволяют непосредственно вмешиваться в физиологические процессы, оценивание последних производится по их физическим или химическим проявлениям. Подлежащие изучению физические процессы относятся к электромагнитным, тепловым, акустическим или механическим, что требует использования соответствующих датчиков (или косвенных измерений: например, оптическим датчиком можно измерять механические величины и т.п.). Это же справедливо и в отношении химических процессов, регистрируемых собственно хемодатчиками или косвенно датчиками физических сигналов.

Во всех случаях принципиальным является выделение одного или нескольких информативных параметров регистрируемых сигналов, адекватных решаемой задаче. На повышение метрологического качества измерения именно этих величин обычно и направлены основные усилия разработчиков [9].

Метрологические характеристики

Далеко не все свойства изучаемого объекта можно измерить непосредственно, используя один датчик, особенно при использовании бесконтактных систем. Во многих случаях именно количество, разнообразие и конфигурация системы датчиков обеспечивают достижение требуемого метрологического качества всей системы. Основная цель любого способа такого комплексирования измерений состоит в достижении наивысших (для данного состава датчиков и вычислительных средств) показателей точности и надежности определения параметров ФС.

В основе комплексирования лежит идея полезного использования некоторой аппаратурной избыточности. Избыточными должны быть датчики одноименных параметров, например, частоты сердечных сокращений (ЧСС) или частоты дыхания (ЧД), при одном весьма важном требовании: разнородным физическим принципам, лежащим в основе функционирования этих датчиков. Последнее обеспечивает разный характер спектров погрешностей величин или параметров, измеряемых этими датчиками. Одноименных датчиков должно быть не менее двух, что позволяет реализовать при комплексировании принцип инвариантности и обеспечить невозмущаемость оценок измеряемых величин. Благодаря этому комплексированная система приобретает качества, которые принципиально не могут быть достигнуты каждым датчиком в отдельности, позволяет автоматизировать процесс исключения артефактов, повысить надежность, целостность и достоверность получаемых данных и в конечном счете гарантированность выполнения целевой функции при наличии ограничений по времени сеанса измерений [4].

С этой точки зрения значимыми характеристиками рассматриваемых систем являются использование прямого или косвенного, активного или пассивного методов измерения, количество датчиков как одноименных, так и разноименных параметров измеряемых сигналов, независимость или зависимость датчиков друг от друга, возможность получать статические или динамические оценки. Если измерения косвенные и требуют сложной обработки первичных данных, важным оказывается отношение процесса измерения к реальному времени: реальное (или квазиреальное с небольшим временным лагом) позволяет использовать конечный результат для мониторинга состояния, постреальное делает мониторинг малоценным или даже невозможным.

В зависимости от характера производимых измерений сравнению подлежат временное, пространственное, температурное, частотное и т.д. разрешения, которые обеспечивают (или могут обеспечить) измерительная система, а также точность и робастность получаемых оценок.

В тех случаях, когда итоговая оценка получается на основе обработки результатов нескольких измерений, вторичные разрешение, точность и робастность могут существенно отличаться от первичных, причем как в одну, так и в другую сторону [10].

Отдельного описания заслуживают системы, основанные на мультимодальных измерениях физиологических сигналов. Мультимодальность разных уровней (прямых, косвенных измерений и итоговых оценок) обеспечивает не только повышение точностных характеристик системы, но и позволяет оценивать свойства живых объектов, принципиально недоступные для оценивания на мономодальной основе. Так, например, неэффективные систолы выявляются одновременной регистрацией электрической активности сердца и механического движения стенок периферических артерий.

Методические характеристики

При исследованиях живых объектов, особенно таких сложных, как человек, на первый план выходят методические проблемы. Зачастую именно тщательное планирование эксперимента и возможность реализовать его на практике определяют достижимость поставленной цели, будь то однократное измерение заданной величины или мультимодальное наблюдение за объектом с экспертной трактовкой получаемых данных.

Основной характеристикой любого измерения свойств живого объекта, отличающегося от неживого своей реактивностью, является воздействие на него, оказываемое в процессе измерения. Если мы не можем считать такое воздействие пренебрежимо малым, приходится учитывать вызываемое им изменение функционирования исследуемого объекта. Важен не сам факт воздействия и даже не вызываемые им изменения как таковые, а искажение целевых показателей, которое даже в случае рутинных медицинских процедур иногда оказывается недопустимо большим. Наконец, если объектом исследования является человек, как правило, не допускается (или специально оговаривается) причинение какого-либо вреда его здоровью.

Независимо от того, контактно или бесконтактно производятся измерения, необходимо обеспечивать ипсативность получаемых оценок. Для этого требуется или автонормирование результатов измерений, или их последующее нормирование на этапе вторичной обработки данных. В наиболее «удобных», с точки зрения исследователя, задачах достаточно нормирования на экспериментальной, а затем на целевой выборке. Применительно к человеку это выборка определенного возрастного, полового, этнического и т.д. состава. В задачах, требующих обнаружения отклонений наблюдаемых физиологических показателей от исходных (особенно в случае анализа наиболее сложных, с выраженными нестационарными свойствами, сигналов), может потребоваться индивидуальное нормирование. Это существенно усложняет весь процесс измерения, поскольку вводит в его методику предварительный этап получения индивидуальных «образцов» сигналов.

Наибольшие трудности вызывает зависимость самой методики измерений, используемого алгоритма обработки данных от меняющегося контекста исследования. Если предполагается обучение системы, может возникнуть необходимость регуляризации, позволяющей в некоторых случаях избежать переобучения и получать достоверные и устойчивые результаты. Это становится самостоятельной, зачастую далеко не тривиальной задачей для разработчиков.

Возможность бесконтактно производить измерения в реальных условиях всегда зависит от минимальной и максимальной дистанции между датчиками и объектом исследования, минимальной и максимальной длительности процесса измерения (когда датчиков несколько, то эти границы определяются наиболее «требовательными» из них). Однако для исследования живых объектов требований к условиям измерения может предъявляться гораздо больше, чем к объектам неживой природы. Среди этих требований есть те, которые определяются групповой или даже индивидуальной спецификой исследуемых объектов. Если таким объектом является человек, то помимо выбора определенной части его тела актуальной становится необходимость ее обнажения (или отсутствие такой необходимости). В свою очередь, это влияет на возможность скрытого наблюдения.

Скрытность наблюдения связана и с возможностью противодействия измерениям со стороны объекта наблюдения: пассивного (в виде отказа от сотрудничества) или активного, с намеренным искажением результатов. Но связь эта не прямая и не однозначная: многое зависит от взаимоотношений между исследователем и его объектом – испытуемым. Если испытуемый должен быть обучен определенному поведению во время исследования или требуется предварительный этап для последующего индивидуального нормирования показателей, скрытность измерений становится труднодостижимой, хотя впоследствии можно скрыть от испытуемого сам момент измерения.

Для решения многих практических задач важны такие характеристики измерительного (в расширенном варианте – информационно-измерительного) комплекса, как его портативность, мобильность и автономность, а также особенности, значимые для конечного пользователя: необходимость специального обучения использованию комплекса и принципиально достижимая степень автоматизации измерительного процесса. Однако в обзоре работ, где большинство описываемых систем представляют собой лабораторные прототипы или несерийные экспериментальные изделия, заслуживают упоминания только ограничения, непреодолимые либо принципиально, либо на сегодняшнем уровне развития промышленных технологий.

Экономические характеристики

Ориентировочные стоимостные характеристики описываемых авторами аппаратно-программных комплексов нами рассматривались только с точки зрения реализуемости экспериментов на начальных этапах исследовательских проектов. Более подробный экономический анализ выходит за рамки этого обзора и представляется нецелесообразным, поскольку даже примерные стоимости используемого комплекса и одного измерения очень сильно зависят от меняющейся экономической и техноло-

гической ситуации в мире. А важнейший итоговый показатель, во многом определяющий эффективность любой подобной разработки – соотношение цены и информативности, – невозможно получить без параллельных измерительных экспериментов в реальных условиях.

Многокритериальный сравнительный анализ методов и систем

В большинстве работ, публикуемых в научных изданиях, описываются лабораторные эксперименты, проводившиеся с использованием прототипов тех систем, образ которых представляют авторы. Поэтому не все характеристики систем, имеющие существенное значение при массовом производстве и использовании в реальных условиях, оказались доступными. Однако методы и принципиальные решения авторов рассматриваемых работ для нашего обзора имеют большую ценность, нежели частные технологические вопросы.

Сравнение физиологических характеристик

Физиологические процессы, подлежащие изучению, и соответственно целевые показатели весьма разнообразны, однако большинство исследователей ориентируется на оценку функционирования систем кровообращения и внешнего дыхания ввиду их ключевой роли в системной физиологии и высокой информативности таких показателей во многих клинических и экспериментальных ситуациях. Эти показатели могут использоваться как для мониторинга состояния пациентов при целом ряде распространенных заболеваний и травм, так и для дифференциации аффективных реакций, оценки относительного уровня нагрузки во время той или иной деятельности и т.д. При сравнении возможностей, которые обеспечивают разные методы измерений, оказывается, что наибольшее разнообразие физиологических показателей можно регистрировать с помощью локационных методов, термографии и регистрации речи (табл. 1).

Бесконтактность измерений позволяет решить некоторые практические задачи, связанные с оценкой кровообращения и дыхания. Так, многие исследователи обращаются к проблеме распознавания эпизодов апноэ во время сна. Очевидно, что использование приборов, вступающих в непосредственный контакт с телом пациента, затруднит засыпание и повлияет на качество сна, а непроизвольные движения снизят качество получаемых данных. В педиатрии применение контактных датчиков может вызвать сопротивление со стороны ребенка, а если речь идет об интенсивной терапии новорожденных, то продолжительное ношение сенсоров способно вызвать раздражение кожи. Пациенты пожилого и старческого возраста могут забывать нательные средства мониторинга или терять их, а также испытывать психологический дискомфорт от их ношения. Применение контактных датчиков бывает крайне затруднено и в ожоговых отделениях, если кожа на участках, с которых требуется производить измерения, повреждена.

В контексте психофизиологических исследований разработка бесконтактных методов оценки систем кровообращения и внешнего дыхания не менее актуальна. Одной из важных и вызывающих большой интерес исследователей задач является распознавание стресса, поскольку тяжелый и особенно хронический стресс оказывает большое влияние на качество повседневной жизни человека. Стрессовая реакция организма сопровождается изменениями активности дыхательной и сердечно-сосудистой систем, поэтому оценка этих изменений позволяет получить информацию о выраженности стресса. Бесконтактные методы, особенно рассчитанные на скрытное наблюдение, дают возможность вести мониторинг, не создавая помех трудовой деятельности испытуемых и не оказывая дополнительного влияния на их психофизиологическое состояние.

Известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы на основе акселерометрии требуют механического (прямого или опосредованного) контакта датчика с испытуемым, поэтому реализуются либо в виде носимых [11], либо в виде прикрепляемых, например, к кровати [12] устройств. Хотя ряд рассматриваемых нами далее методов могут быть конструктивно выполнены аналогичным образом, сфера их возможного применения значительно шире.

Менее распространены системы, позволяющие оценивать терморегуляцию, измеряя температуру кожи и потоотделение [13–18]. Как правило, эти системы служат для выявления паттернов кожной температуры, соответствующих аффективной реакции на различные стимулы. Так, один из рассмотренных методов [15], основанный на инфракрасной съемке лица, был применен в исследовании физиологической основы чувства вины у детей. В качестве стимульного объекта был специально сконструирован игрушечный робот с потайной кнопкой в руке, при нажатии на которую рука отваливалась. В результате анализа проведенной термосъемки было выявлено резкое понижение температуры кончика носа в момент «поломки». Утешение ребенка и починка робота приводили к тому, что температура вновь повышалась до изначального уровня.

Другие процессы, изучаются в контексте своей связи с общепринятыми маркерами ФС и лишь в редких случаях представляют для исследователей самостоятельный интерес. Так, из 5 рассмотренных методов диагностики стресса, основанных на регистрации произносимых звуков и речи, лишь

Таблица 1

Физиологические показатели, первично регистрируемые с помощью отдельных методов измерения

Метод измерения	Частота сердечных сокращений	Частота дыхания	Температура кожи	Артикуляция, фонация	Пото-отделение	Движения частей тела
Дистанционная фотоплетизмография	+	+				
Термография	+		+		+	
Регистрация речи	+			+	+	
Радиолокация	+	+				+
Ультразвуковая локация	+	+				+
Регистрация движений*						+

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – дистанционная бесконтактная регистрация движений осуществляется с помощью сенсоров различного типа: видеокамер, ультразвуковых локаторов, радиолокаторов, лазерных виброметров и др.

один позволяет оценивать его уровень непосредственно по характеристикам артикуляции и фонации [19]. Он получил название StressSense и создавался как индивидуальный инструмент самомониторинга психофизиологического благополучия, адаптирующийся под конкретного пользователя. Алгоритм его работы предполагает выделение из аудиозаписи фрагментов с речью, распознавание реплик пользователя и их классификацию по наличию или отсутствию характерных признаков стрессовой реакции. Остальные 4 метода служат для оценки ЧСС [18, 20–22] и потоотделения [18], которые, в свою очередь, являются общепринятыми маркерами стресса.

Лишь в единичных работах описаны методы на основе регистрации моргания [23] и движения частей тела [24]. Если последняя используется в рамках комплексной оценки качества сна наряду с ЧД и ЧСС, то метод, определяющий частоту моргательных движений, может применяться как самостоятельный инструмент психофизиологических исследований. Аномальная частота моргания может быть признаком стресса, утомления, коррелировать с рассеянностью внимания, а также являться симптомом таких расстройств, как, например, болезнь Паркинсона или синдром Туретта. Процесс выявления моргательных движений состоит из следующих этапов: отслеживание лица с выделением окологлазничной области интереса посредством готовой методики, сегментация изображения глаза, обучение классификатора и измерение различий положения века. Таким образом, исследователи избавлены от необходимости аннотировать видеозаписи вручную, отмечая эпизоды моргания. Несмотря на движения головы испытуемых, существенные различия в их внешности и цвете кожи, авторам удалось добиться удовлетворительной точности распознавания (93,65 %).

Функционирование системы кровообращения оценивается в основном по ЧСС, реже измеряется вариабельность сердечного ритма [25–27], хотя в ряде задач, таких, как определение уровня когнитивного стресса или профилактика синдрома внезапной детской смерти, она является более информативной, чем ЧСС и ЧД. При этом ЧСС может оцениваться как прямо – путем регистрации движений сердца или ближайших к нему участков кожи [28–30], так и косвенно – по пульсовой волне [31]. Во втором случае необходимо учитывать, что ЧСС и частота пульса на периферических артериях могут не совпадать, особенно при патологических процессах, проявляющихся неэффективными (т.е. не приводящими к достаточному выбросу крови) сокращениями миокарда. Кроме того, предложенный метод лазерной допплеровской виброметрии не является бесконтактным в строгом смысле этого слова, так как для усиления сигнала желательно наносить на участки шеи вдоль общей сонной артерии светоотражающий пластырь или грим. Однако в ходе самого измерения он позволяет исключить механическое воздействие датчика на артерию, способное исказить полученные результаты. Также полностью бесконтактным нельзя считать и метод прямой оценки ЧСС путем трехмерной инфракрасной съемки, в котором на грудь наносятся светоотражающие наклейки [30].

Функционирование системы внешнего дыхания также оценивается в основном по одному показателю — характеристикам дыхательных движений. Только в одной работе проведен непосредственный анализ характеристик выдыхаемого воздушного потока, позволяющий выявить центральное и обструктивное апноэ [32]. Эта задача решается посредством анализа ультразвуковых волн, отраженных от головы испытуемого и непосредственно окружающей ее части пространства. Любое

движение как самого испытуемого, так и выдыхаемого воздуха вызывает допплеровский сдвиг частоты сигнала. Волна, отражаемая от головы, имеет небольшой допплеровский сдвиг, но у выдыхаемого воздуха допплеровский сдвиг больше из-за присутствия турбулентности, и скорость движения воздуха также выше, чем скорость движений головы. Путем фильтрования частот и усреднения сигнала можно отделить движение воздуха от движения головы для последующей оценки.

Редко оценивается и величина, позволяющая судить об эффективности внешнего дыхания, например, сатурация гемоглобина крови кислородом [33]. Для решения этой задачи применяется цветная видеосъемка, поскольку оксигемоглобин и дезоксигемоглобин имеют существенно различающийся оптический спектр, а значит, уровень сатурации влияет на цвет кожи. На текущем этапе развития данного подхода удалось добиться высокой корреляции результатов бесконтактной и контактной оксиметрии [33–35], но обнаружилось, что точность метода снижается, если испытуемый страдает анемией [33].

Непосредственно измеряемые величины относятся к физическим; нам не удалось обнаружить работы, авторы которых использовали химические датчики. Чаще всего регистрируют электромагнитное излучение видимого или инфракрасного диапазонов, применяя как видеокамеры [33–36], так и частотные радары [37, 38], реже описывают комбинации нескольких видео- или инфракрасных камер [39], видеокамеры с инфракрасной камерой [16, 17, 40] или фазовый радар [28, 41]. В нескольких работах измерялись акустические величины, регистрируемые микрофоном [18, 20, 21] или ультразвуковым радаром [26, 32].

Вторичная физиологическая трактовка результатов этих измерений обычно ориентирована на активность автономной нервной системы. Лишь в нескольких работах авторов интересовала возможность оценить аффективный статус по поведенческим признакам, таким, как характеристики голоса [19], движения [17] или частота моргания [23]. Уровень активации центральной нервной системы в цикле сон – бодрствование измерялся лишь в одной работе [24], как и комплексные эластические свойства периферических артерий (по скорости распространения пульсовой волны) [31].

Валидность используемых авторами методов подтверждается косвенно, путем сравнения с известными, распространенными и одобренными методами или с экспертными оценками [15]. В единичных работах проводилось сопоставление с результатами непосредственного измерения тех же величин (например, подсчитывая дыхательные движения [42]) или по комплексу показателей [24, 43, 44].

Сравнение метрологических характеристик

По отношению к целевому показателю – той или иной характеристике ФС – бесконтактные методы измерения в физиологии человека почти всегда косвенные. Только допуская некоторое упрощение, можно считать целевыми такие показатели, как температура тела [13–15], скорость потока выдыхаемого воздуха [32] или собственно движение какой-либо части тела [45, 46]. Поэтому наибольшее число описываемых методов основано на косвенных измерениях.

В большинстве рассматриваемых публикаций описываются системы, использующие единственный датчик измеряемой величины (матрицы, используемые в видеокамерах и т.п., считаем одним датчиком). Значительно реже датчиков два [18, 31, 47], в единичных работах три и более [19, 30, 40], но даже в этих работах датчики чаще независимые. Очень редко описывается комплекс датчиков; в качестве примера можно привести метод мониторинга апноэ у детей [40] с помощью игрового контроллера Kinect (v2, Microsoft Corp.). В его комплектацию входят RGB-камера, инфракрасный сенсор и датчик глубины; таким образом, можно говорить о 3 разных сенсорах в одном устройстве. Контроллер имеет функции отслеживания и трехмерной виртуальной реконструкции тела, а также отслеживания суставов, что и позволяет распознавать дыхательные движения даже в темноте и сквозь одеяло.

Описываемые измерения производятся как в реальном/квазиреальном [40, 48, 49], так и в постреальном [15, 29, 50] времени, но все – динамические, что позволяет производить мониторинг ФС. Первичное временное разрешение зависит от используемой аппаратуры и сегодня обычно не ограничивает исследователя физиологических процессов; важнее вторичное разрешение, от которого зависит применимость мониторинговой системы для решения практических задач. В рассматриваемых работах оно составляет от сотых долей секунды [13, 22] до 120 с [51]. В последнем случае такое низкое разрешение обусловлено использованием широкого (но скользящего!) временного окна для накопления данных.

Пространственному разрешению в рассматриваемых работах большого значения не придавалось. В основном оно определялось областью интереса, выделение которой требует много меньшего разрешения, чем обеспечивает даже современная бытовая аппаратура. За исключением одного метода [34], выделение области интереса производилось автоматически или полуавтоматически с помощью специальных алгоритмов.

Точностные характеристики первичных измерений для физиологии сегодня также не составляют проблемы. Однако для вторичных показателей точность измерений, судя по всему, нередко

Таблица 2

Устойчивость различных методов бесконтактного измерения физиологических показателей человека к факторам среды измерения

Метод измерения	Уровень освещенности	Колебания температуры	Колебания влажности	Индивидуальные особенности внешности	Движения испытуемого	Физические препятствия	Посторонние звуки
Дистанционная фото-плетизмография	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Термография	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Регистрация речи	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Средняя
Радиолокация	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая
Ультразвуковая локация	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая
Регистрация движений*	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая

является узким местом и сильно зависит от характера этих показателей: например, если для ЧСС это более 99 % [48], то для различных аспектов аффективного статуса может составлять от 60–65 % [14] до 98,2 % [13], в зависимости от области интереса и конкретной изучаемой эмоции. Впрочем, точность эталонных оценок, а также степень формализации рассматриваемых понятий определяются отнюдь не однозначно, что заставляет особенно осторожно относиться к заявлениям о высокой точности метода, особенно если результаты получены в лабораторных условиях и на небольших выборках.

Наиболее уязвимой характеристикой оказывается робастность получаемых оценок физиологических показателей. Методики, обеспечивающие высокоробастные оценки, есть [23, 24, 48], но их мало. Во многих работах описаны особые условия для проведения измерений, вне которых робастность резко падает [13, 14, 38]. Так, например, для инфракрасной съемки требуются помещения с контролируемой освещенностью, температурой и влажностью, поскольку все эти переменные могут влиять на результат, а один из локационных методов на основе микроволнового допплеровского сенсора показывает наилучшие результаты в комнате с отражающим покрытием на стенах [43]. Подробнее требовательность различных методов к условиям измерений представлена в табл. 2. В среднем наиболее устойчивыми к факторам среды измерения оказываются локационные методы: радиолокация и ультразвуковая локация.

Комбинирование различных датчиков позволяет повысить робастность. К примеру, эффективность методов на основе видеосъемки снижается при плохой освещенности и темном цвете кожи испытуемых, а инфракрасная съемка неспособна регистрировать температуру участков, закрытых очками или волосами, но эти недостатки компенсируются, если использовать видео- и инфракрасную камеру вместе [16]. Создаются и специальные алгоритмы, позволяющие повысить робастность. Так, алгоритм distancePPG [39] разработан для увеличения отношения сигнал/шум при видеомониторинге кровенаполнения поверхностных сосудов. В нем отслеживание изменений цвета кожи на разных участках лица производится с использованием средневзвешенного значения, в котором вес для каждого участка зависит от перфузии крови и уровня освещенности. Это позволяет пользоваться дистанционной фотоплетизмографией при потенциально затруднительных сценариях: если испытуемый темнокожий, если он движется во время съемки или если помещение недостаточно освещено.

Несмотря на очевидные проблемы с робастностью, ни в одной из рассматриваемых публикаций не описывается мультимодальная система, которая могла бы обеспечить существенно более высокие метрологические характеристики. В одном случае [16] авторы называют мультимодальным свой комбинированный метод мониторинга, при котором съемка ведется одновременно в видимом и инфракрасном спектре. Хотя у человека тепловым и световым раздражителям соответствуют разные сенсорные системы, съемка как на обычную, так и на инфракрасную камеру позволяет получить только данные об электромагнитном излучении, причем в близких частотных диапазонах. Это делает такую мультимодальность весьма условной.

Сравнение методических характеристик

Дистанция, на которой производились измерения, в рассматриваемых работах варьировалась, но не превышала 8 м [48]. Вероятно, в первую очередь

это обусловлено использованием для проведения экспериментов недорогой и доступной аппаратуры, а также тем, что основная область перспективного применения разработок этих авторов – клиническая и/или домашняя медицина и исследования в условиях лаборатории. Часть используемых методов допускает (особенно если перейти на другую аппаратную базу) существенное увеличение дистанции.

Применяются как пассивные (к ним можно отнести, например, все измерения посредством аудио- и видеозаписи, инфракрасной термографии), так и активные (в первую очередь локационные) методы измерения. В случае последнего обычно используется электромагнитное излучение (в том числе когерентное [31]), в двух работах – ультразвуковой радар [26, 32]. Предполагается, что значимого (тем более вредного для здоровья) воздействия на испытуемого не оказывается (все контролируемые характеристики воздействия ниже допустимых пределов; большинство используемых приборов производится массово и имеет необходимые сертификаты безопасности).

Сам факт измерения (если оно не скрыто от испытуемого) вполне мог влиять на результаты из-за тревоги у расположенных к этому личностей, Хоторнского эффекта и т.п. Однако к рассматриваемому аспекту измерений – бесконтактности – это прямого отношения не имеет, ибо наблюдается в большинстве ситуаций осознаваемого участия в подобных экспериментах.

Соответственно от того, скрытно или нет производятся измерения (а скрытность допускают почти все описываемые методы), зависит и возможность противодействия измерениям со стороны испытуемого. Ее можно практически исключить, только когда непосредственному измерению подлежат процессы, не доступные для произвольного контроля (например, цвет кожных покровов открытых частей тела при использовании фотоплетизмографических и оксиметрических методов [33, 35, 51]). Пассивное противодействие возможно, если от испытуемого требуется активное участие, например фонировать [18, 20, 21], но такие методы используются редко.

Измерения производились авторами в разных частях тела испытуемого; в тех случаях, когда это было возможным, предпочитали лицо [33, 49, 51] как легко распознаваемую и, главное, почти всегда открытую часть. В случаях, когда для измерений была выбрана другая часть тела, например грудь или живот, ее обнажение, как правило, не требовалось [27, 40], за исключением методики, использующей отражающие наклейки [30], а также методов, рассчитанных на мониторинг младенцев в неонатальном отделении, которые и так полуобнажены [36, 44]. При измерениях сквозь одежду либо производилась оценка целевых показателей, существенно не зависящих от наличия или отсутствия ткани (например, регистрация механического движения в случае достаточно плотно прилегающей одежды [42, 48]), либо этой оценке предшествовало автоматическое (полуавтоматическое) выделение области интереса, позволяющее осуществлять мониторинг даже сквозь одеяло. при условии, что оно не закрывает голову испытуемого [40], либо ориентировались на излучение, позволяющее дифференцировать сигнал, регистрируемый с поверхности кожи, и сигнал от одежды [52].

Ряд локационных методов также позволяет измерять физиологические показатели через препятствия вроде стен и мебели. Так, проект системы VitalRadio для «умного дома» [48] позволяет оценивать ЧД и ЧСС на расстоянии вплоть до 8 м, даже если испытуемый находится в другой комнате. Необходимым условием при этом является квазистатичность, т.е. относительная неподвижность человека (как при работе за компьютером или просмотре телевизора). Сенсоры системы, разработанной для мониторинга ЧД и ЧСС у спящих пациентов в домах престарелых [45], по замыслу авторов размещаются под матрацем. Тот же коллектив предложил систему для оценки когнитивной нагрузки с антенной, прикрепляемой к задней поверхности спинки стула [27].

Очевидная (из-за высокой дисперсии физиологических показателей даже в небольших, достаточно однородных группах людей) во многих случаях необходимость нормирования обрабатываемых данных оказывала существенное влияние на методику измерений [14, 16, 24], но далеко не во всех работах. Выборочное нормирование почти не использовалось (впрочем, оно существенных трудностей обычно и не вызывает), востребованным оказывалось индивидуальное [17, 22, 27]. Именно необходимость индивидуального нормирования зачастую делает невозможным практическое использование того или иного метода за пределами лаборатории.

Возможность и целесообразность использования методов регуляризации и адаптивных алгоритмов большинством авторов не рассматривается. Лишь в нескольких работах обсуждается необходимость учитывать пол, возраст, массу тела и т.п. Так, при апробации системы обнаружения признаков жизнедеятельности и мониторинга физиологической активности на основе допплеровского радара [43] данные 2 испытуемых с наибольшей массой тела оказались пригодными для выявления ЧД и ЧСС только в 2 сценариях из 6. Результаты, полученные с помощью метода определения ЧСС по частоте голоса [21], указывают на необходимость дополнительного изучения половых различий.

Редко используются и методы, требующие обучения системы, от качества которого зависят метро-

Таблица 3

Сравнительная характеристика сенсоров различного типа

Тип сенсора	Дистанция	Подготовка испытуемого	Специализация сенсоров
Видеокамера	Длинная	Не требуется	Широкая
Инфракрасная камера	Длинная	Не требуется	Средняя
Микрофон	Короткая	Инструктаж	Широкая
Радиочастотный радар	Средняя	Не требуется	Средняя
Ультразвуковой радар	Средняя	Не требуется	Средняя
Лазерный виброметр	Условная*	Установка отражающих меток, инструктаж	Узкая

Примечание. * – для улучшения метрологических характеристик ряд методик предполагает механический контакт с испытуемым на этапе подготовки последнего к исследованию, однако во время измерений датчик от испытуемого удален и механически с ним не контактирует.

логические характеристики результата (например, обучение на предварительно отобранных образцах речи). В качестве примера такого метода можно опять же упомянуть систему StressSense [19], имеющую 3 модели классификации. Универсальная модель, наиболее простая из всех, использует один общий неизменяемый классификатор стресса для всех пользователей. Персонализированная модель полностью зависит от конкретного испытуемого и требует обучения на аннотированных вручную аудиоданных. Точность классификации у нее существенно выше, чем у универсальной, поэтому она служит для авторов эталоном, но в реальных ситуациях ее применимость крайне ограничена. Фаза подготовки к работе неудобна и утомительна для пользователя; кроме того, требуются большие вычислительные мощности. Наконец, адаптивная модель сочетает в себе признаки двух предыдущих. При начале работы используется универсальный классификатор, но по мере накопления пользовательских данных он адаптируется либо с помощью ручной аннотации данных, либо путем самообучения.

Поскольку описываются лабораторные эксперименты, вопрос о необходимости обучения исследователя остается открытым (это может оказаться актуальным за пределами лаборатории, особенно если уровень автоматизации процесса не позволит исключить из него человека). Обучение испытуемых требовалось минимальное [19, 24] или, чаще, не требовалось вовсе, что делает эти методы особенно ценными в тех случаях, когда общение с испытуемым затруднено или невозможно.

Подавляющее большинство описываемых авторами измерительных комплексов были вполне мобильными и автономными, однако в силу того, что описывались их лабораторные варианты, редко были портативными. Впрочем, при необходимости портативность относительно легко может быть достигнута: принципиальных препятствий для описываемых методов нет.

В табл. 3 представлено сравнение методов на основе различных датчиков по ряду характеристик, влияющих на организационную сложность эксперимента и соотношение стоимости исследования и качества получаемых данных. Методы, использующие видеокамеры, как правило, обеспечивают наименьшую организационную сложность измерений.

Сравнение экономических характеристик

Стоимостные характеристики лабораторных комплексов и систем по их описанию оценить трудно: оборудование может закупаться или изготавливаться для небольшой серии экспериментов, а может уже иметься в лаборатории. Однако прослеживается явная тенденция к использованию серийно производимого оборудования (оригинальными оказываются его конфигурация и методика использования) и, главное, ориентация на последующую реализацию апробируемых решений в наиболее массовых многофункциональных устройствах (например, смартфонах [19, 24] или ноутбуках со встроенной веб-камерой [33]). Лишь в одной работе представлен авторский, не являющийся коммерческим продуктом измерительный прибор – «умный» фазированный допплеровский приемопередатчик с 4 спиральными антеннами и автоматически направляемым лучом, способным отслеживать перемещения испытуемого и таким образом обеспечивать продолжительный непрерывный мониторинг состояния его дыхательной и сердечно-сосудистой систем [41].

Что же касается затрат непосредственно на измерение, то в большинстве работ они ограничивались тратами на электроэнергию. Расходные материалы (без учета общелабораторных расходов) требовались лишь в тех редких случаях, когда использовались светоотражающие наклейки [30, 31].

Выводы

1. Разработку методов и систем бесконтактного измерения физиологических показателей человека считают актуальной и вполне решаемой задачей во многих научных коллективах. Работы в этом направлении активно ведутся, причем используется очень широкий спектр доступных сегодня технологий с преобладающей ориентацией на массово производимые устройства как в ходе лабораторных экспериментов, так и в перспективе.
2. В научных публикациях представлено мало работ, в которых описываются, возможно, наиболее перспективные методы дистанционной бесконтактной диагностики ФС человека, основанные на использовании химических датчиков, мультимодальных измерений, комплексирования датчиков и применения методов регуляризации.
3. Определены следующие особенности методов дистанционной бесконтактной диагностики ФС человека:

– узкими местами остаются робастность получаемых оценок при измерениях в реальных условиях и точность вторичных показателей;

– наибольшее разнообразие физиологических показателей регистрируется с помощью локационных методов, термографии и регистрации речи;

– наиболее устойчивыми к факторам среды измерения оказываются локационные методы: радиолокация и ультразвуковая локация;

– методы, использующие видеокамеры, обеспечивают наименьшую организационную сложность измерений.

4. Представляется перспективным сформировать и оптимизировать наборы методов и систем для обеспечения различных целевых функций, повышения информативности конечного набора данных и робастности оценок, ключевых для принятия решения.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы 0073-2018-0001 (№ госрегистрации АААА-А16-116051250009-8) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-09482).

Список литературы

1. *Leonova A.B.* The concept of human functional state in Russian applied psychology // Psychol. Russ. State Art. 2009. V. 2. P. 517–538. DOI: 10.11621/pir.2009.0026.

2. *Durkee K., Hiriyanna A., Pappada S., Feeney J., Galster S.* Multi-model approach to human functional state estimation // Foundations of augmented cognition: neuroergonomics and operational neuroscience. AC 2016. Lecture notes in computer science / D. Schmorrow, C. Fidopiastis, eds. V. 9743. Cham, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-39955-3_18.

3. *Wasserman E.L., Kartashev N.K., Roudnitsky S.B., Zhvalevsky O.V.* Aggregation, integration, or full-fledged cyberphysical system? Way of researcher in biomedicine // 2017 Fourth International conference on advances in biomedical engineering (ICABME 2017) (19–21 October 2017, Beirut, Lebanon). Piscataway, NJ, 2017. P. 1–4 (9–12). DOI: 10.1109/ICABME.2017.8167524.

4. *Wasserman E.L., Kartashev N.K., Roudnitsky S.B., Zhvalevsky O.V.* Complex measurement systems in medicine: from synchronized monotask measuring instruments to cyberphysical systems // IT in Industry. 2018. V. 6. № 2. P. 26–31.

5. *Lee I., Ayoub A., Chen S. et al.* Medical cyber-physical systems // Cyber-Physical Systems / R. Rajkumar, D. Niz, M. Klein, eds. Boston, 2016. P. 3–60.

6. *Beer S.* Cybernetics and management. New York, 1959.

7. The nervous system and behavior // Opportunities in biology. Committee on Research Opportunities in Biology, Board in Biology, Commission on Life Sciences, National Research Council. Washington, DC, 1989. P. 175–223. DOI: 10.17226/742.

8. *Stephenson R.* The complexity of human behaviour: a new paradigm for physiotherapy? // Phys. Ther. Rev. 2002. V. 7. № 4. P. 243–258. DOI: 10.1179/108331902235002001.

9. *Прокудин О.А., Немтинов Д.М.* Анализ информативной области тепловизионных изображений на основе модели пространственно-частотного преобразования // Радиотехника. 2013. № 2. С. 107–109.

Prokudin O.A., Nemtinov D.M. Analysis of informative thermal image based on the model space–frequency transform // Radiotekhnika. 2013. № 2. P. 107–109.

10. *Дюк В.А., Жвалевский О.В., Рудницкий С.Б., Толстоногов Д.А.* Предварительные результаты обработки разнотипных данных методами data mining // Труды СПИИРАН. 2009. № 9. С. 197–210. DOI: 10.15622/sp.9.11.

Dyuk V.A., Zhvalevskiy O.V., Rudnitskiy S.B., Tolstonogov D.A. The preliminary results of mixed biometrical data processing by data mining methods // Trudy SPIIRAN. 2009. № 9. P. 197–210. DOI: 10.15622/sp.9.11.

11. *Фунтова И.И., Лучицкая Е.С., Слепченкова И.Н. и др.* Космический эксперимент «Сонокард». Исследование физиологических функций организма бесконтактным методом во время сна в ходе длительного космического полета // Методы и приборы космической кардиологии на борту Международной космической станции: Монография. М., 2016. С. 239–271.

Funtova I.I., Luchitskaya E.S., Slepchenkova I.N. et al. Space experiment «Sonocard». Research of the body's physiological functions using a non-contact method on

sleeping subjects during a long-term spaceflight // Methods and devices of space cardiology aboard the International space station: A monography. Moscow, 2016. P. 239–271.

12. *Feng X., Dong M., Levy P., Xu Y*. Non-contact home health monitoring based on low-cost high-performance accelerometers // IEEE/ACM International conference on connected health: applications, systems and engineering technologies (CHASE). 2017. P. 356–364. DOI: 10.1109/CHASE.2017.24.

13. *Abd Latif M.H., Yusof H.M., Sidek S.N., Rusli N*. Implementation of GLCM features in thermal imaging for human affective state detection // 2015 IEEE International symposium on robotics and intelligent sensors (IRIS 2015). 2015. V. 76. P. 308–315. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.298.

14. *Engert V., Merla A., Grant J.A. et al*. Exploring the use of thermal infrared imaging in human stress research // PLoS ONE. 2014. V. 9. № 3. e90782. DOI: 10.1371/journal.pone.0090782.

15. *Ioannou S., Ebisch S., Aureli T. et al*. The autonomic signature of guilt in children: A thermal infrared imaging study // Ibid. 2013. V. 8. № 11. e79440. DOI: 10.1371/journal.pone.0079440.

16. *Mohd Norzali H.M., Kashima M., Sato K., Watanabe M.* Mental stress recognition based on non-invasive and non-contact measurement from stereo thermal and visible sensors // Int. J. of Affective Engineering. 2015. V. 14. № 1. P. 9–17. DOI: 10.5057/ijae.14.9.

17. *Pavlidis I., Tsiamyrtzis P., Shastri D. et al.* Fast by nature – how stress patterns define human experience and performance in dexterous tasks // Sci. Rep. 2012. V. 2. e305. DOI: 10.1038/srep00305.

18. *Schuller B., Friedmann F., Eyben F.* The Munich Biovoice Corpus: effects of physical exercising, heart rate, and skin conductance on human speech production // Ninth International conference on language resources and evaluation. 2014. P. 1506–1510.

19. *Lu H., Frauendorfer D., Rabbi M. et al*. StressSense: detecting stress in unconstrained acoustic environments using smartphones // Proc. of the 2012 ACM Conference on ubiquitous computing (UbiComp'12). Pittsburgh, USA, 2012. P. 351–360.

20. *Ryskaliyev A., Askaruly S., James A.P*. Speech signal analysis for the estimation of heart rates under different emotional states // 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). 2016. P. 1160–1165.

21. *Sakai M.* Modeling the relationship between heart rate and features of vocal frequency // Int. J. of Computer Applications. 2015. V. 120. № 6. P. 32–37. DOI: 10.5120/21233-3986.

22. *Smith J., Tsiartas A., Shriberg E. et al*. Analysis and prediction of heart rate using speech features from natural speech // IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing (ICASSP). New Orleans, LA, 2017.

23. *Marcos-Ramiro A., Pizarro D., Marrón-Romera M., Gatica-Perez D*. Automatic Blinking Detection towards Stress Discovery // The 16th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI'14). Istanbul, Turkey, 2014. DOI: 10.1145/2663204.2663239.

24. *Rahman T., Adams A.T., Ravichandran R.V. et al.* DoppleSleep: A contactless unobtrusive sleep sensing system using shortrange Doppler radar // Proc. of the 2015 ACM International joint conference on pervasive and ubiquitous computing (UbiComp 2015). P. 39–50. DOI: 10.1145/2750858.2804280.

25. *Davila M.I., Lewis G.F., Porges S.W.* The PhysioCam: a novel non-contact sensor to measure heart rate variability in clinical and field applications // Front. Public Health. 2017. V. 5. № 14. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00300.

26. Ramesh Kumar V., Gokul R., Sunderasan N. et al. Heartbeat rate and heart rate variability extraction using ultrasonic transducer // Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. 2014. V. 3. № 3. P. 10061–10066.

27. *Suzuki S., Matsui T., Sugawara K. et al.* An approach to remote monitoring of heart rate variability (HRV) using microwave radar during a calculation task // J. Physiol. Anthropol. 2011. V. 30. № 6. P. 241–249. DOI: 10.2114/jpa2.30.241.

28. *Obeid D., Zaharia G., Sadek S., El Zein G*. Microwave Doppler radar for heartbeat detection vs electrocardiogram // Microw. Opt. Techn. Let. 2012. V. 54. № 11. P. 2610–2617. DOI: 10.1002/mop.27152.

29. *Othman M.A., Sinnappa M., Azman H. et al.* An analysis of 5.8 GHz microwave Doppler radar for heart-beat detection // Prz. Elektrotech. 2013. V. 89. № 11. P. 202–205. DOI: 10.1109/RadioElek.2013.6530947.

30. *Shafiq G., Veluvolu K.C.* Surface chest motion decomposition for cardiovascular monitoring // Sci. Rep. 2014. V. 4. e5093. DOI: 10.1038/srep05093.

31. *Campo A., Segers P., Heuten H. et al.* Non-invasive technique for assessment of vascular wall stiffness using laser Doppler vibrometry // Meas. Sci. Technol. 2014. V. 25. № 6. e065701. DOI: 10.1088/0957-0233/25/6/065701.

32. *Arlotto P., Grimaldi M., Naeck R., Ginoux J.-M.* An ultrasonic contactless sensor for breathing monitoring // Sensors. 2014. V. 14. № 8. P. 15371–15386. DOI: 10.3390/s140815371.

33. *Bal U*. Non-contact estimation of heart rate and oxygen saturation using ambient light // Biomed. Opt. Express. 2015. V. 6. № 1. P. 86–97. DOI: 10.1364/BOE.6.000086.

34. *Madan C.R., Harrison T., Mathewson K.E*. Noncontact measurement of emotional and physiological changes in heart rate from a webcam // Psychophysiol. 2018. V. 55. № 4. e13005. DOI: 10.1111/psyp.13005.

35. *Tarassenko L., Villarroel M., Guazzi A. et al*. Non-contact video-based vital sign monitoring using ambi-ent light and auto-regressive models // Physiol. Meas. 2014. V. 35. № 5. P. 807–831. DOI: 10.1088/0967-3334/35/5/807.

36. *Villarroel M., Guazzi A., Jorge J. et al*. Continuous non-contact vital sign monitoring in neonatal intensive care unit // Health. Technol. Lett. 2014. V. 1. № 3. P. 87–91.

37. *Girao P.S., Postolache O., Postolache G. et al*. Microwave Doppler radar in unobtrusive health monitoring // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 588. e012046. DOI: 10.1088/1742-6596/588/1/012046.

38. *Lee Y.S., Pathirana P.N., Evans R.J., Steinfort C.L.* Noncontact detection and analysis of respiratory function using microwave Doppler radar // J. of Sensors. 2015. V. 2015. e548136. DOI: 10.1155/2015/548136.

39. *Kumar M., Veeraraghavan A., Sabharwal A.* DistancePPG: robust non-contact vital signs monitoring using a camera // Biomed. Opt. Express. 2015. V. 6. № 5. P. 1565–1588. DOI: 10.1364/boe.6.001565.

40. *Al-Naji A., Gibson K., Lee S.-H., Chahl J.* Real time apnoea monitoring of children using the Microsoft Kinect sensor: a pilot study // Sensors. 2017. V. 17. № 2. e286. DOI: 10.3390/s17020286.

41. *Hall T., Lie D.Y.C., Nguyen T.Q. et al.* Non-contact sensor for long-term continuous vital signs monitoring: a review on intelligent phasedarray Doppler sensor design // Ibid. 2017. V. 17. № 11. E2632. DOI: 10.3390/s17112632.

42. *Ebrahim M.P., Sarvi M., Yuce M.R.* A Doppler radar system for sensing physiological parameters in walking and standing positions // Ibid. 2017. V. 17. № 3. e485. DOI: 10.3390/s17030485.

43. *Kuutti J., Paukkunen M, Aalto M. et al.* Evaluation of a Doppler radar sensor system for vital signs detection and activity monitoring in a radio-frequency shielded room // Measurement. 2015. V. 68. P. 135–142. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.048.

44. *Zhao F., Li M., Jiang Z.Y. et al.* Camera-based, non-contact, vital-signs monitoring technology may provide a way for the early prevention of SIDS in infants // Front. Neurol. 2016. V. 7. e236. DOI: 10.3389/fneur.2016.00236.

45. *Suzuki S., Matsui T., Kagawa M. et al.* An approach to a non-contact vital sign monitoring using dual-frequency microwave radars for elderly care // J. Biomed. Sci. and Engineering. 2013. V. 6. № 7. e34091. DOI: 10.4236/jbise.2013.67086.

46. *Szczyrek J.J., Winiecki W.* On detection and estimation of breath parameters using ultrawideband radar // The 8th IEEE International conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications (IDAACS). 2015. V. 1–2. P. 18–21.

47. *Kazemi S., Ghorbani A., Amindavar H., Li C.Z.* Cyclostationary approach to Doppler radar heart and respiration rates monitoring with body motion cancelation using radar Doppler system // Biomed. Signal Pro-cess Control. 2014. V. 13. № 1. P. 79–88. DOI: 10.1016/j.bspc.2014.03.012.

48. *Adib F., Mao H., Kabelac Z. et al.* Smart homes that monitor breathing and heart rate // Proc. of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems (CHI'15). Seoul, Republic of Korea, 2015. P. 837-846. DOI: 10.1145/2702123.2702200.

49. *Wu H.Y., Rubinstein M., Shih E. et al.* Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world // ACM Transactions on Graphics. 2012. V. 31. № 4. e65. DOI: 10.1145/2185520.2185561.

50. *Kaltiokallio O., Yigitler H., Jantti R., Patwari N.* Non-invasive respiration rate monitoring using a single COTS TX-RX pair // Proc. of the 13th International symposium on information processing in sensor networks (IPSN'14). 2014. P. 59–69.

51. *McDuff D.J., Hernandez J., Gontarek S., Picard R.W.* COGCAM: contact-free measurement of cognitive stress during computer tasks with a digital camera // The 34th annual CHI conference on human factors in computing systems (CHI'16). 2016. P. 4000–4004. DOI: 10.1145/2858036.2858247.

52. *Vinci G., Lindner S., Barbon F. et al.* Six-port radar sensor for remote respiration rate and heartbeat vital-sign monitoring // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2013. V. 61. № 5. P. 2093–2100. DOI: 10.1109/tmtt.2013.2247055.

Поступила 18.10.2018

METHODS OF REMOTE NONINVASIVE RECORDING OF HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS AND MONITORING

Wasserman E.L., Denisova D.M., Roudnitsky S.B.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 20–32

The systematic review of public papers published in 2012–2018 demonstrated the present-day capabilities and standards of remote noninvasive functional diagnostics, as well as recent trends. Pinpointed are instrumental and methodical approaches providing a relatively higher quality and broader spectrum of the physiological measurements. There are still few papers describing chemical sensors, multimodal measurements, interconnecting sensors and methods of regularization. Robustness of real-time evaluations and accuracy of secondary parameters remain to be a bottleneck. Methods of location, thermography and speech furnish the largest diversity of physiological parameters. Radiolocation and ultrasonic location are distinguished by high tolerance of impacting factors. As a rule, the least organizational complexity features methods using video cameras.

Key words: functional state, noninvasive measurement, remote diagnostics.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.825.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПОРНОЙ РАЗГРУЗКИ НА КОРКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ РУКИ В ИММЕРСИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ОБЕЗЬЯНАХ

Бадаква А.М.[1], Миллер Н.В.[1], Зобова Л.Н.[1], Рощин В.Ю.[1, 2]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

E-mail: ambadakva@mail.ru

В исследованиях на 2 обезьянах Macaca mulatta проведена оценка воздействия 3-часовой термонейтральной водной иммерсии по уровень шеи животного, создающей опорную разгрузку, на изменение состояния нейронов представительства руки в первичной моторной коре (М1). При выполнении обезьяной двигательной задачи перевода курсора на периферическую мишень с помощью джойстика оценивались корректирующие влияния различных структур коры головного мозга. В сериях из 2 иммерсий была обнаружена неизменность пороговых значений тока микростимуляции в области представительства руки в М1 (устраняющей и замещающей естественную активность и вызывающей движение руки с пространственно устойчивой конечной точкой), что показывает отсутствие влияния иммерсии на функциональное состояние нейронов этой области. В то же время изменение корректирующих влияний на движение курсора свидетельствует о вероятном воздействии кратковременной опорной разгрузки на структуры париетальной коры, участвующие в планировании и коррекции движений руки при выполнении моторной задачи.

Ключевые слова: обезьяны, иммерсия, микростимуляция, курсор, джойстик, структуры коры головного мозга.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 33–38.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-33-38

Космический полет (КП) оказывает существенное влияние на организм человека. Длительное время изучались сердечно-сосудистая и скелетно-мышечная системы, тогда как имеющиеся знания о воздействии КП на центральную нервную систему человека остаются недостаточными. Известно о сдвигах мозгового ликвора, психологических и нейровестибулярных проблемах, а также изменении когнитивных функций, но существующие данные об основе этих нарушений нейронных механизмов малочисленны [1]. Исследования в КП и наземных моделях с опорной разгрузкой («сухая» иммерсия и антиортостатическая гипокинезия) показали вовлечение мозжечка, кортикальных сенсомоторных и соматосенсорных областей, вестибулярных путей [2–4]. Расширение этих знаний для создания профилактических средств является чрезвычайно важным, особенно с точки зрения длительных межпланетных полетов. Кроме того, новые знания могли бы быть полезными для больных с нейродегенеративными заболеваниями, так же как и для пожилых людей с иммобилизацией и сниженной активностью [5].

Наиболее подходящим объектом для модельных исследований влияния опорной разгрузки на человека являются обезьяны-резусы, которые широко используются для изучения нейрональных механизмов работы мозга по причине своей физиологической близости к человеку. В частности, для обоснования возможности использования в исследованиях на человеке результатов, полученных в экспериментах на обезьянах-резусах, проведено исследование влияния движения зрительного, тактильного и слухового стимулов относительно лица обезьяны на активность вентральной интрапариетальной области, лежащей в интрапариетальной борозде, с помощью функциональной МРТ [6]. В результате исследования сделан вывод о чрезвычайно выраженной гомологичности в нейрональной организации вентральной интрапариетальной области у человека и обезьян-резусов.

Длительная (0,5–1 с) стимуляция некоторых точек в области представительства руки в первичной моторной коре (М1) обезьяны и человека с помощью введенного в нее микроэлектрода серией двухфазных электрических импульсов малой амплитуды вызывает различные сложнокоординированные движения руки к одной и той же конечной точке, положение которой не зависит от исходной позиции руки и характерно для данной точки стимуляции, что предполагает наличие в М1 млекопитающих функциональных зон, каждая из которых выражает этологически определенную категорию

движения [7]. Вместе с тем этот вывод свидетельствует о возможности тестирования изменения состояния нейронов представительства руки в М1 обезьяны под влиянием внешнего воздействия на ее организм (в частности, иммерсии) с помощью анализа характеристик заранее определенных движений руки, вызываемых длительной микростимуляцией найденных точек М1 [8].

Ранее нами было обнаружено заметное влияние 5-часовой водной иммерсии по уровень шеи на качественное изменение траекторий компьютерного курсора, управляемого обезьяной с помощью джойстика, при переведении курсора из центра экрана на периферическую мишень, что могло быть следствием изменения состояния нейронов М1, дорзальной премоторной коры и париетальной коры, участвующих в планировании и контроле движений руки [9].

Целью проведенного исследования была оценка воздействия водной иммерсии по уровень шеи обезьяны, создающей опорную разгрузку, на изменение состояния нейронов представительства руки в М1 и движений курсора, отражающих влияние различных структур коры головного мозга на планирование и контроль движения руки обезьяны при выполнении двигательной задачи управления курсором с помощью джойстика.

Методика

Исследовали 2 обезьян-самцов Macaca mulatta (А и Б) массой 4–5 кг до и после 2 сеансов иммерсии по уровень шеи, проведенных с 2-недельным перерывом. В течение нескольких месяцев животных приучали к экспериментальным условиям и обучали выполнению двигательной задачи управления положением курсора на экране компьютерного дисплея с помощью джойстика [10]. Обезьяна, сидящая в специальном приматологическом кресле перед компьютерным дисплеем, переводила курсор из центра экрана дисплея на возникающую мишень-кружок. Мишень предъявлялась в одном из 8 фиксированных положений, лежащих на окружности с центром, совпадающим с центром экрана, в случайном порядке. При попадании курсора внутрь мишени и удержании его там заданное время значения каждой траектории движения курсора в координатах дисплея сохранялись в памяти компьютера с шагом 40 мс для последующей обработки, а обезьяна получала подкрепление в виде порции яблочного сока из штуцера. После возвращения курсора в центр экрана и устанавливаемой паузы начинался следующий цикл появления периферической мишени. Задачу перевода курсора предъявляли обезьяне до и после каждого сеанса иммерсии, а также через 1 и 2 сут после каждой из 2 иммерсий.

При хирургической подготовке на черепе каждой обезьяны было установлено технологическое акриловое кольцо, армированное дюралюминием с набором резьбовых отверстий и позволяющее фиксировать голову животного, крепить съемную стереотаксическую пластину, имеющую отверстия диаметром 0,6 мм с шагом 1 мм для введения микроэлектродов, и монтировать защитный колпак [10].

Для регистрации активности нейронов при картировании коры изготовляли и использовали вольфрамовые микроэлектроды в стеклянной изоляции с сопротивлением кончика в диапазоне от 0,5 до 2,0 МОм на частоте 1 кГц, помещенные в металлическую направляющую канюлю с внешним диаметром 0,6 мм. Для введения электрода в мозг в костях черепа сверлили вручную канал, проведя сверло диаметром 0,6 мм через отверстие в съемной стереотаксической пластине. Электрод в направляющей канюле вводили через образовавшийся канал до твердой мозговой оболочки. Перемещение микроэлектрода в коре мозга с помощью микроподачи и выбор позиции регистрации осуществляли при визуальном и аудиоконтроле нейрональной активности.

Картирование представительства руки в М1 осуществляли в области с соответствующими стереотаксическими координатами по атласу мозга обезьяны с помощью бифазной микростимуляции (с длительностью импульса 0,2 мс, частотой бифазной комбинации 200 Гц и общей длительностью 500 мс, амплитудой до 110 мкА) и наблюдения за выраженными длительными движениями предплечья, запястья и пальцев обезьяны, возникающими при таких параметрах стимуляции [11]. Делая треки более каудально, находили точки, в которых моторные ответы руки на микростимуляцию наблюдались на глубине вплоть до 5–6 мм, что означало нахождение кончика электрода в переднем склоне центральной борозды. Отсутствие моторных реакций на микростимуляцию при наличии нейрональной активности на большой глубине в еще более каудальных точках означало нахождение электрода в заднем склоне центральной борозды, т.е. переход в область первичной соматосенсорной коры.

Для поиска выраженного движения руки каждой обезьяны с пространственно устойчивой конечной точкой движения использовали микростимуляцию области М1 односекундной последовательностью бифазных импульсов с амплитудой тока 110 мкА и частотой 110 Гц [12]. До начала и после завершения 3-часовой иммерсии трижды определяли значения амплитуды тока микростимуляции, при которых по мере уменьшения силы тока с шагом 5 мкА движение прекращалось. Предыдущее значение оценивали как пороговое. Естественно, что у обеих обезьян выбранные движения с пространственно устойчивой конечной точкой как в 1-й, так и во 2-й иммерсии несколько отличались, но во всех случаях конечная точка движения кисти руки была у лица.

Опорную разгрузку в условиях невесомости моделировали в специальном помещении оригинальным методом водной иммерсии обезьян [13], во время которой животное, одетое в хлопчатобумажный костюмчик для предотвращения всплытия фекалий животного и мягко фиксированное в специальном приматологическом кресле, находилось в течение 3 ч в иммерсионной ванне, наполненной по уровень шеи обезьяны водой с термонейтральной температурой 34,5 ± 0,5 °С. После завершения иммерсии кресло с обезьяной извлекали из ванны, животное высушивали полотенцами и потоком воздуха, создаваемого тепловой пушкой. Тестирования выполнения обезьяной двигательной задачи до и после иммерсии проводили в лабораторных условиях.

При обработке траекторий курсора вычисляли косинус угла α между текущим направлением движения курсора и текущим направлением на мишень в точках с шагом в 40 мс и усредняли этот показатель по всем точкам траектории, получая затем среднее значение этого показателя для всех траекторий (M ± m) за сеанс. Поскольку при текущем направлении движении курсора, перпендикулярном текущему направлению на мишень, значение косинуса равно нулю, а при совпадении направлений – единице, можно рассматривать усредненное значение величины $(\cos \alpha)_{ср}$ за сеанс как интегральный показатель влияния различных областей коры мозга обезьяны на планирование и контроль движения руки при управлении курсором во время выполнения двигательной задачи животным.

Все экспериментальные воздействия проводились в соответствии с требованиями гуманного содержания и обращения с животными и одобрены Комиссией по биомедицинской этике ИМБП (протокол № 476 от 28.06.2018 г.).

Результаты и обсуждение

При микростимуляции выбранной точки представительства руки в М1, устраняющей и замещающей естественную активность нейронов [14] и вызывающей движение руки с пространственно устойчивой конечной точкой у обезьяны А до и после 1-й иммерсии, пороговые значения тока микростимуляции не отличались и равнялись 70 мкА. До и после 2-й иммерсии (для другой точки микростимуляции и соответствующего движения руки) пороговые значения тока микростимуляции у той же обезьяны также не отличались и равнялись 50 мкА. У обезьяны Б результаты были качественно подобными: пороговые значения тока микростимуляции не отличались при сравнении величин до и после обеих иммерсий и составляли 75 и 45 мкА – в 1-й и 2-й иммерсиях соответственно. Таким образом, эти результаты свидетельствуют об отсутствии влияния кратковременной опорной разгрузки на функциональное состояние нейронов представительства руки в М1.

У обеих обезьян после иммерсий качественно изменялся характер траекторий движения курсора во время выполнения сеанса двигательной задачи главным образом за счет большего количества его корректирующих движений. На рис. 1 для примера представлены совокупности траекторий движения курсора к мишени, сохраненные в памяти компьютера во время выполнения сеанса двигательной задачи управления движением курсора к периферической мишени в 8 положениях с помощью джойстика, до и после 1-й иммерсии у обезьяны А.

Для количественной оценки влияния иммерсии на изменение траекторий движения курсора во время выполнения двигательной задачи вычисляли интегральный показатель $(\cos \alpha)_{ср}$ до иммерсии, после и через 1 и 2 сут. Соответствующие результаты у обезьяны А представлены на рис. 2 и 3. В результате 1-й иммерсии $(\cos \alpha)_{ср}$ уменьшился с 0,565 ± 0,005 до 0,386 ± 0,013 ($p < 0,001$), частично восстановился до значения 0,539 ± 0,006 ($p < 0,01$) через 1 сут после иммерсии и достоверно не отличался от исходного (0,578 ± 0,005) через 2 сут. Аналогичным было влияние 2-й иммерсии: $(\cos \alpha)_{ср}$ уменьшился с 0,578 ± 0,016 до 0,374 ± 0,009 ($p < 0,001$), частично восстановился до значения 0,451 ± 0,006 ($p < 0,001$) через 1 сут и достоверно не отличался от исходного значения (0,614 ± 0,007) через 2 сут после иммерсии.

Несмотря на то что обе обезьяны переносили иммерсию достаточно спокойно, не демонстрируя видимых признаков стресса, обезьяна Б после завершения 1-й иммерсии периодически прекращала выполнение двигательной задачи, плохо справляясь с управлением курсором. Поэтому количество полученной информации оказалось недостаточным для достоверных статистических оценок. На рис. 4 представлены результаты обработки данных, полученных у обезьяны Б после проведения 2-й иммерсии. $(\mathrm{Cos}\ \alpha)_{ср}$ уменьшился с 0,402 ± 0,002 до 0,263 ± 0,003 ($p < 0,001$) после иммерсии, еще больше снизился через 1 сут (0,236 ± 0,002; $p < 0,001$) и не восстановился до исходного значения (0,301 ± 0,002; $p < 0,001$) через 2 сут после завершения иммерсии. Существенным является тот факт, что иммерсия вызывала снижение интегрального показателя $(\cos \alpha)_{ср}$ у обеих обезьян (в 2 сеансах иммерсии у обезьяны А и в 1 – у обезьяны Б).

В планирование, выполнение и контроль движений руки к визуальным мишеням вовлекаются париетальная кора, дорзальная премоторная и М1, образующие сеть с прямыми и обратными связями [9]. Поскольку наши данные показали отсутствие влияния опорной разгрузки на нейроны М1, возможной причиной изменения интегрального показателя $(\cos \alpha)_{ср}$ при выполнении обезьянами

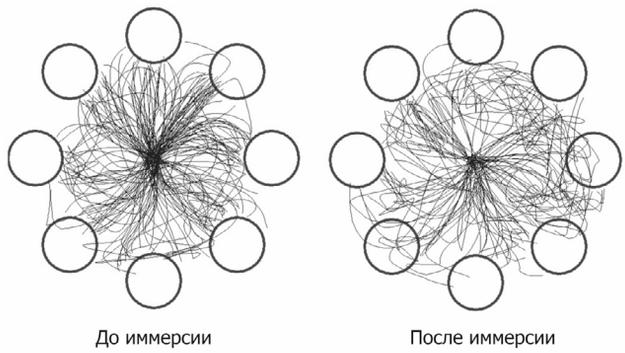

Рис. 1. Совокупности траекторий движения курсора к мишени, сохраненных в памяти компьютера во время выполнения сеанса двигательной задачи управления движением курсора к периферической мишени в 8 положениях с помощью джойстика, до (слева) и после (справа) иммерсии у обезьяны А

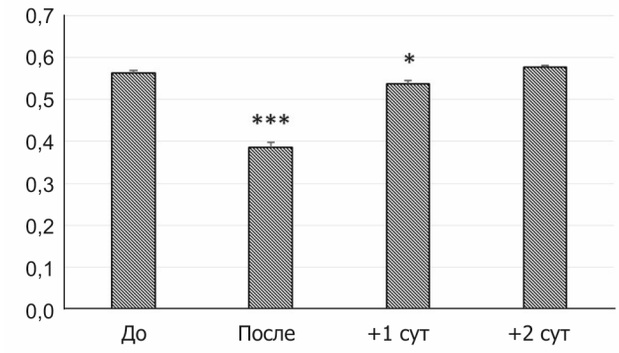

Рис. 2. Влияние иммерсии на интегральный показатель $(\cos \alpha)_{ср}$, – среднее по всем траекториям за сеанс тестирования значение косинуса угла между текущим направлением на мишень и текущим направлением движения курсора (M ± m) у обезьяны А в 1-й иммерсии. *** – p < 0,001, * – p < 0,01

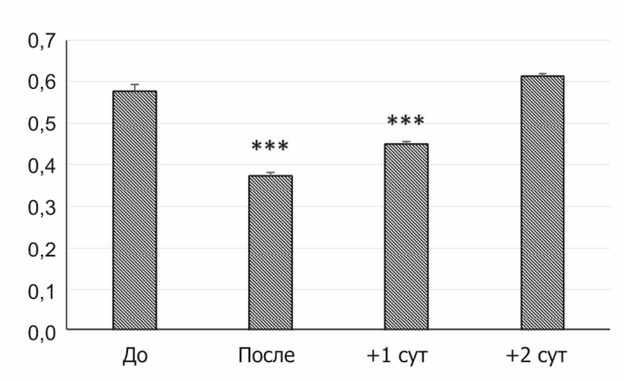

Рис. 3. Влияние иммерсии на интегральный показатель $(\cos \alpha)_{ср}$, – среднее по всем траекториям за сеанс тестирования значение косинуса угла между текущим направлением на мишень и текущим направлением движения курсора (M ± m) у обезьяны А во 2-й иммерсии. *** – p < 0,001

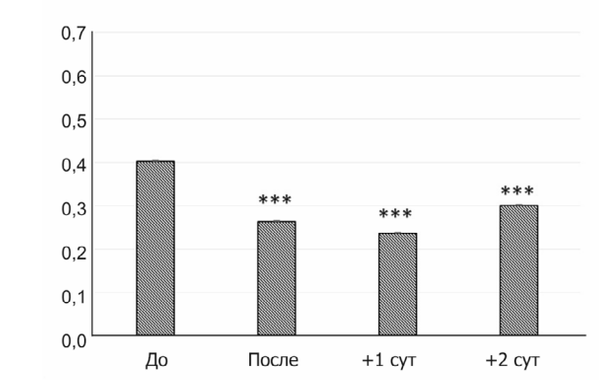

Рис. 4. Влияние иммерсии на интегральный показатель $(\cos \alpha)_{ср}$, – среднее по всем траекториям за сеанс тестирования значение косинуса угла между текущим направлением на мишень и текущим направлением движения курсора (M ± m) у обезьяны Б. *** – p < 0,001

моторной задачи может быть воздействие иммерсии на нейроны как дорзальной премоторной, так и париетальной коры.

Долгое время задняя париетальная кора рассматривалась как типичная ассоциативная кора, обеспечивающая мультисенсорную интеграцию в создании единой карты, выход которой связан с фронтальной корой для управления поведением. Позднее накопились свидетельства существования разнообразия различных функциональных областей в противоположность представлению о гомогенной области, которая создает единое перцептуальное представительство. В дальнейшем было установлено, что париетальная кора вовлекается в различные аспекты планирования движения. И наконец, в последние годы проведен ряд исследований, показавших участие париетальной коры в планировании и контроле движения руки [15].

Двух обезьян Macaca mulatta обучили использовать джойстик, чтобы вести курсор на компьютерном экране к периферической мишени при поддержании центральной зрительной фиксации [16, 17]. При проведении эксперимента было обнаружено, что нейроны париетальной коры вовлекаются не только в формирование плана движения, но и в мониторирование траектории курсора во время выполнения его движения, что обеспечивает непрерывный контроль и коррекцию ошибок траектории.

Эксперименты на 2 макаках-резусах, нажимающих по памяти 1 из 15 кнопок, показали, что планирование в париетальной коре включает в себя не только положение мишени, но и траектории

движения руки к конечной точке [18]. Результаты исследования, проведенного на 2 обезьянах-резусах с движением руки в трехмерном пространстве, свидетельствуют, что париетальная кора может обеспечить информацию о траектории руки в естественных условиях [19].

В исследованиях, целью которых являлось выявление роли дорзальной премоторной коры в регуляции движения руки, 2 обезьяны Macaca mulatta осуществляли нажатие на 1 из 8 кнопок, расположенных на вершинах куба, с прямым движением к кнопке или со сменой направления движения, связанной с изменением позиции кнопки. Было установлено, что дорзальная премоторная кора кодирует сложные команды для коррекции замысла движения, тогда как париетальная кора, по-видимому, отвечает за оценку кинематики моторной периферии, что является существенным шагом в разрешении моторной коре модифицировать траекторию руки [20].

Аналогичные выводы сделаны и в исследованиях с участием человека. Активность планирования движения руки у человека в париетальной и дорзальной премоторной коре оценивали, используя функциональную МРТ во время задач с задержанным ответом [21]. Исследования показали, что вовлечение обеих структур в планирование траекторий значительно отличается: дорзальная премоторная кора представляет как прямые, так и сложные траектории руки, тогда как париетальная кора – только идущие прямо к мишени. Сделан вывод, что сложное и требующее вычислений планирование движения управляется фронтальным путем, тогда как париетальный путь мог бы гарантировать альтернативный и более быстрый путь для приведения простых планов в действие.

Учитывая простоту моторной задачи, выполняемой обезьяной в наших исследованиях (перевод курсора из центра экрана на периферическую мишень), можно считать, что обнаруженное снижение интегрального показателя $(\cos \alpha)_{ср}$ под влиянием иммерсии отражает ухудшение процессов планирования и контроля движения руки обезьяны в структурах париетальной коры, участвующих в выполнении двигательной задачи управления курсором с помощью джойстика.

Выводы

Кратковременная опорная разгрузка, создаваемая у обезьян водной иммерсией по уровень шеи:

– не оказывает влияния на функциональное состояние нейронов представительства руки в первичной моторной коре;

– по-видимому, воздействует на структуры париетальной коры, ухудшая планирование и контроль движений руки при выполнении двигательной задачи управления курсором с помощью джойстика.

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН № 63.1.

Авторы выражают большую благодарность ФГБНУ «НИИ медицинской приматологии», предоставившему обезьян для исследований, особенно научному руководителю института академику РАН Б.А. Лапину, заведующей питомника Г.Ж. Кочконян и старшему научному сотруднику И.Н. Клоцу, оказавшему неоценимую помощь в отборе обезьян.

Список литературы

1. *Roberts D. R., Albrecht M.H., Collins H.R. et al.* Effects of spaceflight on astronaut brain structure as indicated on MRI // New Eng. J. of Med. 2017. V. 377. № 18. P. 1746–1753.

2. *Koppelmans V., Bloomberg J.J., Ajitkumar P. et al.* Brain structural plasticity with spaceflight // npj Microgravity. 2016. V. 2. № 1. P. 2.

3. *Koppelmans V., Bloomberg J.J., De Dios Y.E. et al.* Brain plasticity and sensorimotor deterioration as a function of 70 days head down tilt bed rest // PloS ONE. 2017. V. 12. №. 8. P. e0182236.

4. *Van Omberger A., Demertzi A., Tomilovskaya E. et al.* The effect of spaceflight and microgravity on the human brain // J. Neurology. 2017. V. 264. № Suppl 1. P. 18–22.

5. *Van Ombergen A., Laureys S., Sunaert S. et al.* Spaceflight-induced neuroplasticity in humans as measured by MRI: what do we know so far? // npj Microgravity. 2017. V. 3. № 1. P. 2.

6. *Guipponi O., Wardak C., Ibarrola D. et al.* Multimodal convergence within the intraparietal sulcus of the macaque monkey // J. of Neurosci. 2013. V. 33. № 9. P. 4128–4139.

7. *Graziano M.S.A.* Ethological action maps: a paradigm shift for the motor cortex // Trends Cognitive Sci. 2016. V. 20. № 2. P. 121–132.

8. *Бадаква А.М., Зобова Л.Н., Миллер Н.В., Рощин В.Ю.* Воздействие длительной внутрикортикальной микростимуляции на моторную кору // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 5. С. 1–7.

Badakva A.M., Zobova L.N., Miller N.V., Roschin V.Yu. Influence of long-term intracortical microstimulation on the motor cortex // Fiziologiya cheloveka. 2017. V. 43. № 5. P. 1–7.

9. *Archambault P.S., Caminiti R., Battaglia-Mayer A.* Cortical mechanisms for online control of hand movement trajectory: the role of the posterior parietal cortex // Cerebral Cortex. 2009. V. 19. № 12. P. 2848–2864.

10. *Бадаква А.М., Бондарь И.В., Зобова Л.Н. и др.* Разработка макета инвазивного интерфейса мозг – компьютер в экспериментах на обезьянах // Авиакосм. и экол. мед. 2013. Т. 47. № 2. С. 61–64.

Badakva A.M., Bondar I.V., Zobova L.N. et al. Development of invasive brain – computer interface in monkeys // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2013. V. 47. № 2. P. 61–64.

11. *Graziano M.S.A., Taylor C.S.R., Moore T., Cooke D.F.* The cortical control of movement revisite // Neuron. 2002. V. 36. № 3. P. 349.

12. *Van Acker III G.M., Amundsen S.L., Messamore W.G. et al*. Effective intracortical microstimulation parameters applied to primary motor cortex for evoking forelimb movements to stable spatial end points // J. Neurophysiol. 2013. V. 110. P. 1180–1189.

13. *Миллер Н.В., Зобова Л.Н., Бадаква А.М*. Влияние иммерсии по уровень шеи на характеристики установки взора у обезьян // Авиакосм. и экол. мед. 2009. Т. 43. № 5. С. 32–37.

Miller N.V., Zobova L.N., Badakva A.M. Neck-deep immersion effects on gaze fixation by primates // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2009. V. 43. № 5. P. 32–36.

14. *Cheney P.D., Griffin D.M., Van Acker G.M.* Neural hijacking: action of high-frequency electrical stimulation on cortical circuits // Neurosci. 2013. V. 19. № 5. P. 434–441.

15. *Cui H*. From intention to action: hierarchical sensorimotor transformation in the posterior parietal cortex // ENEURO.0017-14.2014.

16. *Mulliken G. H., Musallam S., Andersen R.A*. Forward estimation of movement state in posterior parietal cortex // PNAS. 2008. V. 105. № 24. P. 8170–8177.

17. *Mulliken G. H., Musallam S., Andersen R.A*. Decoding trajectories from posterior parietal cortex ensembles // J. Neurosci. 2008. V. 28. №. 48. P. 12913–12926.

18. *Torres E.B., Quian Quiroga R., Cui H., Buneo C.* Neural correlates of learning and trajectory planning in the posterior parietal cortex // Frontiers in Integrative Neurosci. 2013. V. 7. P. 39.

19. *Hauschild M., Mulliken G.H., Fineman I. et al*. Cognitive signals for brain–machine interfaces in posterior parietal cortex include continuous 3D trajectory commands // PNAS. 2012. V. 109. № 42. P. 17075–17080.

20. *Archambault P.S., Ferrari-Toniolo S., Battaglia-Mayer A.* Online control of hand trajectory and evolution of motor intention in the parietofrontal system // J. Neurosci. 2011. V. 31. № 2. P. 742–752.

21. *Pilacinski A., Lindner A*. Distinct representations of planned reach trajectories in human premotor and posterior parietal cortex // bioRxiv. 2017. P. 154385.

Поступила 04.07.2018

STUDIES OF THE PLANTAR UNLOADING EFFECT ON CORTICAL MECHANISMS OF ARM MOVEMENTS CONTROL IN IMMERSION EXPERIMENTS WITH PRIMATES

Badakva A.M., Miller N.V., Zobova L.N., Roshchin V.Yu.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 33–38

Investigations with two Macaca mulatta were aimed to study the effects of 3-hour support unloading in neutral-water immersion to the neck on the arm neurons presentation in the primary motor cortex (M1). The correcting response of various brain structures to shifting the curser with a joystick toward a peripheral target was evaluated. A series of two immersions evidenced for constancy of current thresholds during M1 microstimulation that annuls and substitutes the natural arm activities producing arm movements with a spatially stable end point. Consequently, the investigations denied immersion impact on the neuronal functioning in this region. However, changes in the correcting response to the cursor shift suggest that the short-term support unloading affects planning and correction of arm movements by the parietal cortex.

Key words: primates, immersion, microstimulation, cursor, joystick, cortex structures.

УДК 629.789+59.08:591.8

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ГЛАЗА У РЫБ DANIO RERIO, НАХОДИВШИХСЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Дадашева О.А., Гурьева Т.С., Грушина О.А., Медникова Е.И., Ионов С.В., Сычев В.Н.

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

E-mail: gurieva@imbp.ru

В работе приведены данные гистологических исследований строения органов зрения у рыб Danio rerio, экспонированных в течение 36 сут на борту Международной космической станции. Известно, что зрение является важным дистанционным органом чувств, который дает рыбе представление о местонахождении. Гистологические исследования глаз рыб из полетной группы выявили у них признаки снижения объема стекловидного тела, очаговые изменения в структуре внутренних слоев сетчатки, образование складок сетчатки. Причиной подобных нарушений в структуре глаз у рыб из полетной группы, скорее всего, является снижение поступления диализата плазмы крови из артериальных капилляров хороида за счет падения гидростатического давления в них или уменьшение секреции водянистой влаги эпителиальными клетками в области радужки. Эти изменения приводят к нарушению передачи импульсов от фоторецепторных клеток (колбочковых и палочковых) в зрительные доли среднего мозга.

Ключевые слова: невесомость, рыба Danio rerio, гистологические исследования, глаза, стекловидное тело, сетчатка.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 39–42.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-39-42

Восприятие и ориентация в пространстве животного организма на Земле определяются деятельностью гравитационно-независимых систем: зрительной, слуховой и обонятельной, а также гравитационно-зависимых систем: вестибулярной и опорной. Гравитационно-зависимые системы, будучи ориентированными на работу в земном гравитационном поле, являются пусковым механизмом атипичных реакций организма при переходе к условиям измененной силы тяжести. Однако и у гравитационно-независимых систем отмечаются изменения при переходе организма животного из гравитации в невесомость. Так, в условиях невесомости астронавты испытывают снижение остроты зрения на расстоянии и вблизи. Предполагается, что эти изменения связаны со смещением краниальной жидкости в организме [1]. После экспозиции в условиях невесомости на борту космического аппарата «Бион-М1» у мышей были обнаружены проблемы со зрением, которые могли быть вызваны нарушениями в кровоснабжении головного мозга и соответственно зрительного аппарата [2]. При исследованиях эмбрионов японского перепела, прошедших весь эмбриологический цикл в условиях невесомости, были обнаружены аномалии в развитии глаза, относящиеся к микроофтальмии и к нарушениям пропорциональности роста пигментного эпителия и нейральной сетчатки [3].

Целью данной работы являлись сравнительные гистологические исследования строения глаз взрослых особей рыб Danio rerio, экспонировавшихся в условиях космического полета на борту Международной космической станции (МКС), и у рыб из наземного контроля.

Методика

Объектом исследований являлись взрослые рыбы Danio rerio. Популярная аквариумная рыбка, которая известна в англоязычной литературе как zebrafish. В настоящее время Danio rerio, которая относится к виду пресноводных лучеперых рыб семейства карповых (Cyprinidae), является наиболее изученным модельным объектом среди рыб. Danio rerio имеет небольшие размеры (до 4–5 см), обитает в пресных тропических водоемах Индии и Южной Азии [4].

Космический эксперимент «Исследование влияния условий космического полета на эмбриогенез, онтогенез, органогенез и поведение гетеротрофных организмов (рыб), обитающих в водной среде» (шифр «Аквариум-AQH») был проведен в соответствии с Соглашением между Японским аэрокосмическим исследовательским агентством (JAXA) и Федеральным космическим агентством (Роскосмос) от 5 июля 2012 г. На борт МКС рыбы в количестве 18 шт. были доставлены в специально разработанном контейнере и размещены в оборудовании AQH (рис. 1). Оборудование AQH предоставляет возможности для размещения маленьких пресноводных рыбок и других мелких гидробионтов.

Оборудование AQH состоит из одной закрытой системы водной циркуляции с 2 аквариумами. У аквариума есть автоматическая система подачи

Рис. 1. Камера содержания рыб – А; камера фиксации рыб на борту МКС – Б

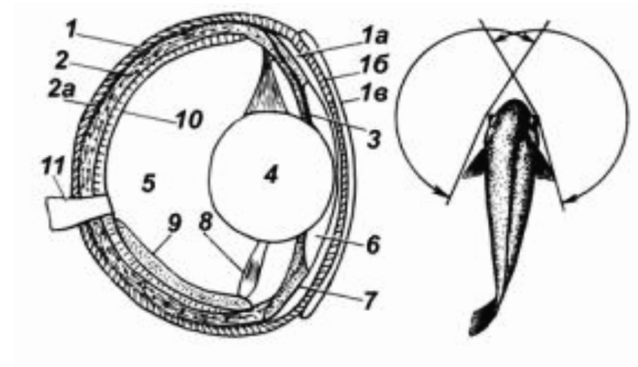

Рис. 2. Строение глаза и поле зрения рыб (по Ильмаст Н.В., 2005).
1 – склера; 1а–1в – слои роговицы; 2 – сосудистая оболочка; 2а – пигментный слой сосудистой оболочки; 3 – радужная оболочка; 4 – хрусталик; 5 – задняя камера; 6 – передняя камера; 7 – кольцевая связка; 8 – сократительная мышца; 9 – серповидный отросток; 10 – сетчатка; 11 – зрительный нерв

питания, светодиодное освещение для цикла день/ночь и камера CCD для наблюдения. Аквариумная среда поддерживается при помощи контроля расхода воды, контроля температуры воды, обмена растворимого газа с воздухом и биологической/физической фильтрации. Также в оборудовании AQH имеются возможности, такие, как проверка качества воды, водообмен, замена фильтра отходов и т.д., чтобы можно было проводить эксперимент до 90 дней. Оборудование AQH размещено в рабочем объеме MSPR (многоцелевая стойка небольшой нагрузки) в модуле КИБО американского сегмента МКС.

Продолжительность эксперимента составила 36 сут, по окончании которого рыбы были зафиксированы на борту в 4%-ном параформальдегиде на фосфатном буфере (pH 7,2) и доставлены на Землю. Контролем служили рыбы, находившиеся в оборудовании AQH на Земле.

Рыбы, зафиксированные из полетной и контрольной групп, были залиты в парафин. Из парафиновых блоков сделали тотальные поперечные срезы рыб толщиной в 5–7 мкм (μ). Готовые препараты, для проведения гистологического исследований были переданы JAXA российским специалистам в ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Полученные препараты (каждый 5-й) окрашивали гематоксилином и эозином по методу Караччи [5]. Изучение и фотографирование препаратов проводили на световом уровне с помощью микроскопа Unilus-12 (Япония) и камеры LevenhukR C 800.

Результаты и обсуждение

Вестибулярная и визуальная информация – 2 основных фактора, которые используют рыбы для контроля положения в условиях гравитации. Для большинства видов рыб зрение является важным органом чувств. Зрение является дистанционным органом чувств, который дает рыбе представление о местонахождении. Зрение у большинства рыб монокулярное, т.е. каждый глаз видит самостоятельно.

Строение глаз рыб, в том числе Danio rerio, имеет ту же общую структуру, что и у высших позвоночных. На рис. 2 представлено строение глаза костистых рыб. Глаз рыбы имеет 3 оболочки: склера (наружная), сосудистая (средняя) и сетчатка, или ретина (внутренняя). Склера защищает глаз от механических повреждений, в передней части глаза образует прозрачную роговицу уплощенной формы. С помощью сосудистой оболочки осуществляется кровоснабжение глаза. В передней части глаза сосудистая оболочка переходит в радужную, имеющую отверстие – зрачок, в который выдается хрусталик. Хрусталик в верхней части поддерживается связкой, а в нижней части он при помощи особой мышцы (колокол Галлера) прикрепляется к серповидному отростку на дне глазного яблока, который имеется у большинства костистых рыб. Хрусталик у рыб шаровидный. Аккомодация (настройка на резкость) осуществляется не путем изменения кривизны хрусталика, а при помощи мышцы (колокол Галлера), которая подтягивает или удаляет хрусталик от сетчатки. Хрусталик имеет такую же плотность, как и вода, в результате чего свет, проходя через него не преломляется и на сетчатке получается четкое изображение.

На гистологических препаратах глаза у рыб из контрольной группы (рис. 3, А) видно, что сетчатка состоит из 10 слоев. Наружный пигментный слой у рыб Danio rerio широкий. Цитоплазма отросчатых клеток пигментного эпителия густо заполнена зернами черно-коричневого пигмента меланина. Ядра

фоторецепторных клеток имеют округлую форму и темно-базофильную окраску. Темно-базофильные округлые ядра ганглиозного слоя лежат однорядно с образованием небольших скоплений на отдельных участках внутреннего отдела сетчатки. Пучки нервных волокон, сформированных из аксонов ганглиозных клеток, принимающих импульсы от нижележащих рецепторных и биполярных клеток, образуют зрительный нерв, выходящий из глазного яблока в области слепого пятна.

Хрусталик глаза Danio rerio имеет округлую форму, прозрачный, выдается в полость глазного яблока почти до роговицы. Ткань хрусталика состоит из вытянутых безъядерных волокон, окруженных плотной капсулой. Передняя часть хрусталика выстлана однослойным плоским эпителием. Клетки хрусталика, обращенные к камере стекловидного тела, вытянуты. На отдельных гистологических препаратах волокна имеют вид продольных светлых и более темных участков. Стекловидное тело представляет собой массу прозрачного студнеобразного, аморфного межклеточного вещества. Оно ограничено внутренней пограничной мембраной сетчатки, хрусталиком и радужной оболочкой. способствует растяжению и прилеганию внутренних слоев сетчатки к пигментному слою, а также играет важную роль в метаболизме сетчатки. Вместе с водянистой влагой стекловидное тело поддерживает внутриглазное давление (рис. 3, А).

На гистологических срезах глаз рыб Danio rerio из полетной группы обнаружено уменьшение объема стекловидного тела, складчатость сетчатки, структурные изменения хрусталика и внутренних слоев сетчатки (рис. 4, Б, В). Образование складчатости объясняется снижением внутриглазного давления из-за уменьшения жидкости в полости глаза. В хрусталике глаза у полетных рыб наблюдается вакуолизация отдельных волокон и образование продольных складок на границе с волокнистым слоем капсулы (см. рис. 4, В). Хрусталик тесно прилегает к роговице, задняя поверхность его прижата к сетчатке с образованием прогибов слоев, что отчетливо видно на рис. 4 Б–Г. На участках давления хрусталика и прогибов наблюдаются очаговые скопления клеток ганглиозного слоя, ядра клеток имеют овальную форму с ослаблением их базофильности, пикноз и лизис ядер (см. рис. 4, Б, В).

У одной особи из опытной группы обнаружены резко выраженные изменения, характеризующиеся сжатием не только внутренней мембраны, оптических волокон и ганглиозного слоя, но и уплощением плексиформных слоев вплоть до наружного ядерного слоя, состоящего из ядер фоточувствительных клеток (палочковых и колбочковых) (см. рис. 4, Г). В области радужки отмечено наличие стаза и малокровие капилляров хороида, участвующих в образовании водянистой жидкости (влаги). В этой области

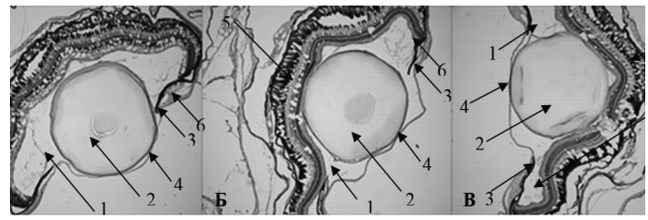

Рис. 3. Гистологическая картина глаза рыб, ув. х10.
А – контроль; Б, В – полет; 1 –стекловидное тело; 2 – хрусталик; 3 – радужная оболочка; 4 – роговица; 5 – сетчатка; 6 – хороид

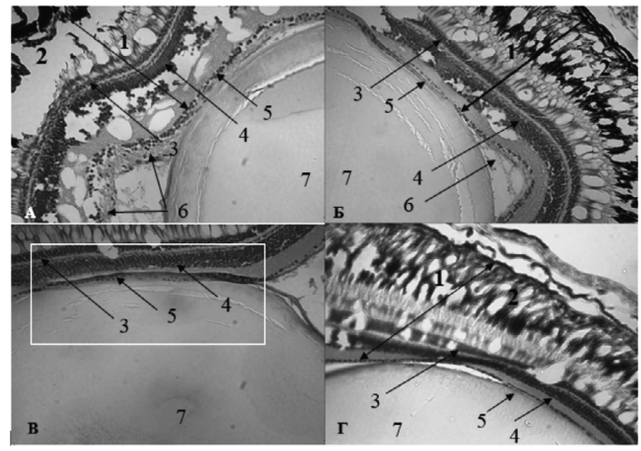

Рис. 4. Гистологическая картина глаза рыбы Danio rerio, ув. х40.
А – контроль; Б–Г – полет; 1 – сетчатка; 2 – пигментный слой; 3 – наружный ядерный (зернистый) слой; 4 – внутренний ядерный (зернистый) слой; 5 – слой ганглиозных клеток; 6 – пучки нервных волокон, образующих зрительный нерв; 7 – хрусталик

видны зерна черного пигмента (меланина), что в норме не наблюдается в глазах рыб из контрольной группы.

Причиной подобных нарушений в структуре глаз у рыб из полетной группы, скорее всего, является снижение уровня поступления диализата плазмы крови из артериальных капилляров хороида за счет падения гидростатического давления в них или уменьшения секреции водянистой влаги эпителиальными клетками в области радужки. Это привело к изменению количества и качества водянистой жидкости (влаги), особенно в стекловидном теле. Сжатие хрусталиком сетчатки, в том числе нервных волокон, может привести к нарушению передачи импульсов от фоторецепторных клеток в зрительные доли среднего мозга. Являются ли эти возникшие изменения обратимыми, сказать сложно, так как отсутствовал биоматериал рыб после возвращения на Землю.

Выводы

Полученные сравнительные данные по изучению гистологической структуры глаза у рыб Danio rerio, экспонированных в условиях космического полета, и у рыб из наземного контроля выявили существенные изменения в строении глаза у рыб из полетной группы, которые были связаны:

– со снижением объема стекловидного тела, что привело к уменьшению полости задней камеры;
– с образованием складок и очаговых изменений структуры внутренних слоев сетчатки;
– вакуолизацией и очаговым уплотнением хрусталиковых волокон, приводящих к изменению контуров хрусталика;
– малокровием артериальных капилляров в области радужки.

Работа выполнена в рамках СЧ ОКР «МКС (Наука)» ИМБП и в рамках базовой темы РАН № 65.4.

Список литературы

1. *Taibbi G., Cromwell R.L., Karoor K.G.* The effect of microgravity on ocular structures and visual function: a review // Sury Ophthalmol. 2013. V. 58. № 2. P. 155–163.

2. *Тарасова О.С., Сафронов С.И., Борзых А.А. и др.* Вазомоторные реакции мелких артерий разных органов // Космический научный проект «Бион-М1» / А.И. Григорьев, ред. М., 2016. С. 310–317.

Tarasova O.S., Sofronova S.I., Borzykh A.A. et al. The vasomotor reactions of small arteries of various organs // Space scientific project «Bion-M1» / A.I. Grogoriev, ed. Moscow, 2016. P. 310–317.

3. *Гурьева Т.С., Дадашева О.А., Григорян Э.Н. и др.* Особенности морфогенеза глаза у эмбрионов перепела, развившихся в условиях невесомости //Авиакосм. и экол. мед. 2002. Т. 37. № 6. С. 50–55.

Gurieva T.S., Dadasheva O.A., Grigoryan E.N. et al. Features morphogenesis of the eyes of quail embryos developed in microgravity // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2002. V. 37. № 6. P. 50–55.

4. *Cohen B., Yakushin S.B., Holstein G.R. et al.* Vestibular experiments in space // Experimentation with animal models in space / G. Sonnenfeld, ed. 2005. P. 105–164.

5. *Иванов Ю.В.* Морфологические методы исследования в гигиене и токсикологии. М., 1983. С. 50–51.

Ivanov Yu.V. Morphological methods of research in hygiene and toxicology. Moscow, 1983. P. 50–51.

Поступила 21.09.2018

CHARACTERISTICS OF THE EYE STRUCTURE IN FISH DANIO RERIO AFTER EXPOSURE IN MICROGRAVITY

Dadasheva O.A., Gurieva T.S., Grushina O.A., Mednikova E.I., Ionov S.V., Sychev V.N.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 39–42

The paper presents the Danio rerio eye histology data following 36 days of exposure on the International space station. As it is known, vision is a primary remote sense organ that gives the fish an idea about its location. Histological investigations of space-flown fishes revealed signs of vitreous body reduction, focal changes in the retina inner layers, and folds in the retina. The factor for these structural disorders appears to be a decreased flux of plasma dialysate from the choroid arterial capillaries due to the hydrostatic pressure drop or low aqueous humor secretion by the iris epithelium. These changes disturb phototransduction from the cone and rod photoreceptor cells to the brain optic lobes.

Key words: microgravity, Danio rerio fish, histological investigations, eyes, vitreous body, retina.

УДК 613.648.4:612.119

ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ КАРТИНЫ БЕЛОЙ КРОВИ У ВЕРТОЛЕТЧИКОВ, ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Мальцев В.Н., Ушаков И.Б.

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

E-mail: iushakov@fmbcfmba.ru

Статья посвящена возможности использования информационно-энтропийного анализа белой крови для интегральной оценки регуляции лейкопоэза у вертолетчиков через 5–7 лет после окончания работ по ликвидации аварии на Чернобыльской атомной станции (ЧАЭС). Доза внешнего облучения составляла 0,2–0,3 Гр. Установлено, что в указанные отдаленные сроки после завершения работ по ликвидации аварии на ЧАЭС у вертолетчиков содержание лейкоцитов в периферической крови сохранялось в норме, но изменялось относительное содержание клеток. Это свидетельствует о нарушении работы регуляторных систем, контролирующих лейкопоэз, что проявлялось в изменении показателей энтропии белой крови. Значения данных показателей превышали норму, но не достигали уровня, характерного для развития патологии.

Ключевые слова: информационный анализ, энтропия, лейкопоэз, вертолетчики, внешнее γ-облучение, анализ крови, Чернобыльская атомная станция.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 43–48.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-43-48

Изучение влияния малых доз радиации на организм привлекает большое внимание ученых [1–4]. Согласно концепции НКДАР [1], малыми дозами редкоионизирующего излучения для человека приняты дозы менее 0,1 Гр [4]. Данные об их воздействии на организм противоречивы [5]. Трудность проблемы заключается в том, что требуется оценить минимальный эффект при использовании вариабельных биологических методик. Возникает необходимость применения интегрального показателя, который сможет объединить все слабовыраженные изменения отдельных компонентов изучаемой системы и представить их в обобщенном виде. Таким показателем может быть энтропия – основной показатель теории информации [6]. Установлено: чем сложнее рассматриваемая система, у которой большое число прямых и обратных связей между составляющими ее компонентами, тем больше объем циркулирующей в ней информации. После воздействия радиации или других стрессовых факторов при наличии значительных структурных повреждений клеток, тканей и регуляторного ответа организма растет мера беспорядка в системе, приближая организм к развитию патологических процессов и срыву адаптации (энтропия возрастает).

Методы информационно-энтропийного анализа были использованы в физиологии [7, 8], гематологии, биохимии, онкологии [9] и микробиологии [10]. При этом установлено, что при любом патологическом процессе возникают препятствия на путях циркуляции информации. Их условно называют «шумами». Чтобы преодолеть их воздействие, система увеличивает объем содержащейся в ней информации за счет использования информационных резервов, что приводит к увеличению энтропии. Было установлено, что у летчиков по мере увеличения стажа работы повышается энтропия белой крови с 56 до 67 % [11]. Превышение верхней границы нормы энтропии (67 %), по мнению авторов, характеризует состояние предболезни, а значения данного показателя выше 75 % могут свидетельствовать о патологии.

В данной статье рассмотрена возможность использования энтропии в качестве интегрального показателя для косвенной оценки изменения показателей лейкопоэза у вертолетчиков – ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) через 5–7 лет после завершения работ и воздействия на них малых доз излучения.

Методика

Под наблюдением находились 44 вертолетчика, принимавшие участие в ликвидации аварии на ЧАЭС в 1986 г., из них 12 были обследованы через 5 лет, а 32 – через 7 лет после завершения работ. Предположительные показатели суммарной дозы радиационного воздействия составили 0,2–0,3 Гр, т.е. были близки к минимальным [12]. В качестве контроля использовали результаты обследования 40 вертолетчиков, не подвергавшихся воздействию радиации.

При обработке данных о содержании клеток белой крови в периферической крови использовали методы информационно-энтропийного анализа,

Таблица

Информационная характеристика белой крови у вертолетчиков в отдаленные сроки после окончания работ на Чернобыльской АЭС

Клетки крови	Показатели	Контроль	Время после окончания работ на Чернобыльской АЭС, годы	
			5	7
Лейкоциты, M ± m	× 10^9/л	5,6 ± 0,2	6,0 ± 0,3	5,8 ± 0,4
Нейтрофилы палочкоядерные	p_i, %	1,5	3,4	5,3
	$- p_i \log_2 p_i$	0,1330	0,1659	0,2246
Нейтрофилы сегментоядерные	p_i, %	60,3	51,0	48,1
	$- p_i \log_2 p_i$	0,4400	0,4954	0,5079
Эозинофилы	p_i, %	2,2	3,9	4,4
	$- \log_2 p_i$	0,1211	0,1825	0,1983
Базофилы	p_i, %	0,4	0,2	0,2
	$- p_i \log_2 p_i$	0,0319	0,0179	0,0179
Лимфоциты	p_i, %	29,4	38,0	36,9
	$- p_i \log_2 p_i$	0,5192	0,5304	0,5307
Моноциты	p_i, %	6,2	3,5	5,1
	$- p_i \log_2 p_i$	0,2487	0,1693	0,2190
Σ	p_i, %	100,0	100,0	100,0
	$- p_i \log_2 p_i$	1,4939	1,5614	1,6985
	h_i, %	57,9	60,5	65,8
	R_i, *биты*	0,6289	0,6167	0,5808
	R_i, %	42,1	39,5	34,2
	$H_{Oi\ пом.}$, *биты*	0	0,0675	0,2046
	$H_{Oi,\ пом,}$, %	0	4,5	13,7
	I_i, *биты*	1,4939	1,4264	1,2893
	I_i, %	100	95,5	86,3
	$R_{i,\ исп,}$, %	0	6,2	18,8

описанные в работах [13, 14]. Рассчитывались следующие показатели:

1. Абсолютная энтропия, отражающая информацию в битах, и рассчитываемая как сумма вероятностей каждого отдельного элемента системы по формуле

$$H = \Sigma - p_i (\log_2 p_i), \qquad (1)$$

где p_i – содержание определенных клеток в белом ростке периферической крови в относительных долях. Значения [$- p_i (\log_2 p_i)$] взяты из таблицы [14]. Из уравнения (1) (формулы Шеннона) следует: со сложностью системы происходит рост энтропии.

Группы вертолетчиков, подвергавшиеся облучению и анализируемые через 5 и 7 лет, рассматривались как наблюдаемые. Абсолютные значения энтропии в опытных и контрольной группах обозначались соответственно H_{Oi} и H_K .

2. Относительная энтропия (h, %) отражает уровень дезорганизации системы относительно максимально возможного уровня ($H_{макс}$). Он рассчитывался, исходя из того, что все элементы информационной системы содержатся в ней в равных долях. В нашем случае p_i для каждого из 6 элементов составляет 0,167. По таблице [14] для p_i = 0,167 значение [$- p_i (\log_2 p_i)$] = 0,4301 бита, при этом максимальная энтропия должна быть в 6 раз больше, т.е. $H_{макс}$ = 2,5806 бита.

Относительная энтропия (h_i, %) рассчитывается как частное от деления суммы абсолютного показателя энтропии системы в отдельных группах (H_i) на максимально возможную $H_{макс}$:

$$h_i, \% = (H_i / H_{макс}) \times 100 \qquad (2)$$

Относительная энтропия показывает степень приближения патологического процесса к пределу ($H_{макс}$), соответствующему срыву адаптации). Началу развития патологического процесса в системе соответствует уровень энтропии 75 % [11]. При последующем развитии патологии энтропия (мера

беспорядка и дезорганизации в системе) стремится к максимальному значению, соответствующему 100 %.

3. Абсолютный информационный резерв системы (в битах) может использоваться для стабилизации в системе или препятствовать нарастанию беспорядка в ней. Он равен разности $H_{макс}$ - H_i .

4. Количество информации в абсолютном выражении (в битах), поглощаемой помехами ($H_{i\ пом}$) или «шумами» в подвергавшихся облучению группах, по сравнению с контрольной группой может быть определено как:

$$H_{i\ пом.}\ Биты = H_{Oi} - H_K. \qquad (3)$$

В норме и в контроле помехи («шумы») на путях циркуляции информации отсутствуют, как и потери информации.

5. Относительные величины потери информации за счет помех в опытных группах (в %) по сравнению с контрольной группой могут быть записаны в виде уравнения:

$$H_{i\ пом}, \% = [(H_{Oi} - H_K)/ H_K] \cdot 100. \qquad (4)$$

6. Информационные резервы системы (R_i) (в %) в отдельных группах рассчитываются как 100 – (h_i, %) и характеризуют оставшиеся возможности регуляторных систем в группах в отношении поддержания большей устойчивости системы и меньшей скорости приближения к развитой патологии с максимальной энтропией $H_{макс}$.

7. Количество полезной информации, которая может еще быть использована для компенсации изменений в системе в опытных группах (I_{Oi}.) (в битах) уменьшается на величину потерь, связанных с воздействием помех («шумов»), уравнение (3). Полезная информация в группах в битах может быть определена на основе следующего уравнения:

$$I_i, = (H_{макс} - H_i) = 2{,}5806 - H_i \qquad (5)$$

В контроле (I_K = 2,5806 - H_K) вся информация полезна и составляет 100 %. Абсолютные значения полезной биоинформации в битах в облученных группах могут быть вычислены аналогично I_{Oi} , = ($H_{макс}$ - H_{Oi}) = 2,5806 - H_{Oi}. По сравнению с нормой (контролем) относительно него количество полезной информации в опытных группах определяется из уравнения $I_{Oi} = (I_{Oi}/ I_K)$ 100 %.

8. Абсолютное количество информационных резервов в битах, использованных для стабилизации деятельности информационной системы ($R_{исп}$) = R_K - R_O, а по отношению к контролю в % определяется уравнением:

$$(R_{исп}), \% = [(R_K - R_O) / R_K] \cdot 100. \qquad (6)$$

Результаты и обсуждение

Полученные результаты обследования вертолетчиков через 5 и 7 лет после завершения работ и в контрольной группе, не подвергавшейся воздействию излучения, представлены в таблице. Содержание лейкоцитов в периферической крови во всех сравниваемых группах вертолетчиков колебалось в пределах нормы: M ± m = (6,0 ± 0,3) × 10^9/л; (5,8 ± 0,4) × 10^9/л; (5,6 ± 0,2) × 10^9/л. Относительное содержание клеток белой крови у вертолетчиков по сравнению с нормой отличалось. Число палочкоядерных нейтрофилов, эозинофилов и лимфоцитов было повышено, а сегментоядерных нейтрофилов и моноцитов – понижено. Причем максимальные изменения имели место в группе вертолетчиков через 7 лет после завершения работ. Столь разнообразные колебания данных затрудняли их интегральную оценку. Однако применение информационно-энтропийного анализа позволило сделать однозначные выводы. В группе контроля, судя по данным таблицы, абсолютное значение энтропии в битах H_K = 1,4939, что составило минимальную величину 57,9 % от $H_{макс}$, определяющую развитую патологию, возможный срыв адаптации и развитие болезни (h_i, % = 57,9). В обеих группах вертолетчиков после 5 и 7 лет показатели абсолютной энтропии H_O были увеличены и составляли соответственно 1,5614 и 1,6985 бита. Также были повышены значения энтропии относительно максимально возможного уровня h_i, % = 60,5 и 65,8 %.

Из таблицы следует, что в группах «чернобыльцев» были снижены информационные резервы системы (R_i) с 42,1 % в контроле до 39,5 и 34,2 % в сравниваемых группах вертолетчиков через 5 и 7 лет.

В контрольной группе (в норме) вся информация применялась с пользой для поддержания устойчивого состояния системы без потерь. Воздействие помех «шумов» на путях циркуляции информации у вертолетчиков постепенно увеличивалось. В абсолютном выражении потери информации в битах $H_{пом.}$, биты за 2 года с 5 до 7 лет после радиационного воздействия в малых дозах увеличились почти в 3 раза и составили в наблюдаемых группах 0,0675 и 0,2046 бита, что достигало 4,5 и 13,7 % биоинформации контрольной группы соответственно. Из данных, приведенных в таблице, следует, что на противодействие и борьбу с ними система использовала 6,2 и 18,8 % своих информационных резервов ($R_{исп}$, %).

Вместе с тем в группах вертолетчиков уменьшалось количество полезной по сравнению с нормой (контролем) информации за счет помех («шумов»). По отношению к норме относительное количество полезной информации в опытных группах снижалось со 100 % в контроле до 93,7 и 81,1 % через 5 и 7 лет соответственно.

На основании проведенных наблюдений можно сделать вывод, что у вертолетчиков, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, имеются изменения в деятельности информационной системы, контролирующей и регулирующей состав периферической крови. Однако относительные показатели энтропии h_i, % через 5–7 лет после завершения работ составили 60,5 и 65,8 % и не достигали уровня патологии, превышении относительная энтропии 75 % [11].

Причиной выявленных изменений в работе информационной системы могут быть морфологические и функциональные нарушения в деятельности системы эндокринных органов, регулирующих гемопоэз. Многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что после облучения в гипоталамусе, гипофизе и щитовидной железе отмечены атрофия, дистрофия, деструкция и нарушения функции нейросекреторных клеток [15–18]. После воздействия радиации в организме формируется состояние эндокринной дезинтеграции [19–21], что проявляется повышенной заболеваемостью эндокринной системы [22, 23] и других органов [24] у работников атомной промышленности с большим стажем.

Морфологические и функциональные нарушения в эндокринных органах можно рассматривать как помехи, или «шумы», на путях циркуляции информации. Носителями информации могут быть многие биологические субстанции, в частности гормоны. Увеличение содержания в крови некоторых гормонов отмечается в ранние сроки после воздействия излучения на организм [17] и сохраняется длительное время после облучения [25]. Другим носителем информации, по-видимому, следует считать кейлоны [15], которые являются продуктами распада клеток. Они воспринимаются таламусом и гипоталамусом, деятельность которых влияет на продукцию соответствующих клеток. В процессе циркуляции информации принимают участие цитокины, обеспечивающие взаимодействие между клетками главным образом на уровне костного мозга [26, 27]. В работах многих авторов установлено, что после воздействия излучения на организм увеличивается содержание в крови туморнекротического фактора, интерлейкинов-1 и -6 и др. [28–31], и это состояние продолжается длительное время [32, 33]. С точки зрения рассматриваемой в статье проблемы все перечисленные субстанции можно считать носителями информации.

Использование методов информационно-энтропийного анализа позволило охарактеризовать и суммировать разнонаправленные изменения в сложной системе регуляции лейкопоэза и дало возможность суммарно оценить минимальные изменения отдельных показателей в отдаленные сроки после воздействия малых доз ионизирующего излучения.

Выводы

1. Через 5–7 лет после завершения работ по ликвидации аварии на ЧАЭС у вертолетчиков, подвергавшихся воздействию излучения в дозах 0,2–0,3 Гр, наблюдали нормальное содержание лейкоцитов в периферической крови, но измененное относительное содержание клеток белой крови.
2. Состояние информационной системы, контролирующей гемопоэз у вертолетчиков, характеризуется возникновением помех на путях циркуляции информации, компенсаторным увеличением энтропии, снижением полезной, переданной для реализации информации, использованием информационных резервов для нормализации работы системы. Однако данные изменения не достигали уровня, характерного для патологии.
3. Энтропия как интегральный показатель может использоваться для оценки состояния системы, контролирующей гемопоэз в отдаленные сроки после воздействия на организм излучения в малых дозах.

Список литературы

1. Источники и эффекты ионизирующих излучений. Отчет НКДАР ООН-2000. Т. 1 М., 2002.

Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000. Report. V. 1. Moscow, 2002.

2. *Илюхин А.В., Зубенкова Э.С., Кахетелидзе М.Г.* Лейкопоэз. Кинетика лейкоцитов крови и эндогенная гуморальная и нервная регуляции // Нормальное кроветворение и его регуляция / Н.А. Федоров, ред. М., 1976. Ч. III. Гл. 11. С. 458–488.

Ilyukhin A.V., Zubenkova E.S., Kakhetelidze M.G. Leukopoiesis. The kinetics of blood leukocytes and endogenous humoral and nervous regulation In the book // Normal blood formation and its regulation / O.N. Fedorov, ed. Moscow, 1976. P. III. Ch. 11. P. 488–488.

3. *Котеров А.Н.* Молекулярно-клеточные закономерности, обуславливающие эффекты действия малых доз ионизирующей радиации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т. 45. № 5. С. 5–20.

Koterov A.N. Molecular cell numbering, causing the effects of low doses of ionizing radiation // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2000. V. 45. № 5. P. 5–20.

4. *Котеров А.Н.* От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснования // Там же. 2013. Т. 58. № 2. С. 5–21.

Koterov A.N. From very small to very large doses of radiation: new data on the establishment of ranges and their experimental and epidemiological studies // Ibid. 2013. V. 58. № 2. P. 5–21.

5. *Тихонов М.И.* К вопросу о влиянии малых доз ионизирующей радиации на здоровье человека // ВИНИТИ РАН. Экол. экспертиза. Обз. инф. ВИНИТИ РАН. 2013. № 3. С. 2–27.

Tikhonov M.I. On the effect of low doses of ionizing radiation on human health // VINITI RAN. Ekologicheskaya ekspertiza. Obozrenie inf. VINITI RAN. 2013. № 3. P. 2–27.

6. *Винерт Н.* Кибернетика как управление и связь в животном и машине. М., 1983.

Wienert N. Cybernetics as control and communication in the animal and the machine. Moscow, 1983.

7. *Брайнес С.Н.* Биологическая и медицинская кибернетика. М., 1971.

Braynes S.N. Biological and medical cybernetics. Moscow, 1971.

8. *Коган Л.Б.* Биологическая кибернетика. М., 1977.

Kogan L.B. Biological cybernetics. Moscow, 1977.

9. *Бандарин В.А.* Теория информации в медицине. Минск, 1974.

Bandarin V.A. Information theory in medicine. Minsk, 1974.

10. *Мальцев В.Н., Шлип М., Саадави А. и др.* Анализ информационной системы, контролирующей состояние микрофлоры кожи в норме и патологии // Журнал микробиологии, эпидемиологии, иммунологии. 1995. № 4. С. 95–98.

Maltsev V.N., Shlip M., Saadavi A. et al. Analysis of the information system that controls the state of the microflora of the skin in health and disease // Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii, immunologii. 1995. № 4. P. 95–98.

11. *Тихончук В.С., Ушаков И.Б., Карпов В.Н., Зуев В.Г.* Возможности использования новых интегральных показателей периферической крови человека // Воен.-мед. журнал. 1992. № 3. С. 27–30.

Tikhonchuk V.S., Ushakov I.B., Karpov V.N., Zuev V.G. The possibility of using new integral indicators of human peripheral blood // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 1992. № 3. P. 27–30.

12. *Ушаков И.Б. Арлащенко Н.И., Солдатов С.К., Попов В.И.* Экология человека после Чернобыльской катастрофы. Воронеж, 2001.

Ushakov I.B., Arlaschenko N.I., Soldatov S.R., Popov V.I. Human ecology after the Chernobyl disaster. Voronezh, 2001.

13. *Черныш В.И., Напалков А.В.* Математический аппарат биологической кибернетики. М., 1964.

Chernysh V.I., Napalkov A.V. Mathematical apparatus of biological cybernetics. Moscow, 1964.

14. *Бандарин В.А.* Болезнь и информационный шум // Теория информации в медицине. Минск, 1974. С. 69–77.

Bandarin V.A. Disease and information noise // Information theory in medicine. Minsk, 1974. P. 69–77.

15. *Бетц Э.* Материалы к изучению эндокринного синдрома, вызванного общим облучением организма. М., 1961.

Betz E. Materials for the study of endocrine syndrome caused by the total irradiation of the body. Moscow, 1961.

16. *Драздин Н.М.* Радиационная эндокринология. Минск, 1971.

Drazdin N.M. Radiation endocrinology. Minsk, 1971.

17. *Мороз Б.Б., Кендыш И.Н.* Радиационные эффекты и эндокринные факторы. М., 1975.

Moroz B.B., Kendysh I.N. Radiation effects and endocrine factors. Moscow, 1975.

18. *Дедов В.И., Дедов И.И., Степаненко В.Ф.* Радиационная эндокринология. М., 1993.

Dedov V.I., Dedov I.I., Stepanenko V.F. Radiation endocrinology. Moscow, 1993.

19. *Закиров Д.З.* Влияние ионизирующего излучения на функции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 2. С. 57–60.

Zakirov D.Z. The effect of ionizing radiation on the functions of the hypothalamic-pituitary-adrenal system // Vestnik KRSU. 2012. V. 12. № 2. P. 57–60.

20. *Павлов А.В., Ермакова О.В., Кораблева Т.В. и др.* Морфологический анализ фолликулярной структуры щитовидной железы при хроническом γ-облучении в малых дозах // Морфология. 2013. Т. 143. № 21. С. 43–46.

Pavlov A.V., Ermakova O.V., Korableva T.V. et al. Morphological analysis of the follicular structure of the thyroid gland during chronic γ-irradiation in small doses // Morfologiya. 2013. V. 143. № 21. P. 43–46.

21. *Кувенов А., Кащенко С., Кувенова О.* Структура щитовидной железы у крыс после обучения рентгеновскими лучами // Укр. журнал клин. и лаб. мед. 2013. Т. 8. № 1. С. 59–60.

Kuvenov A., Kashchenko S., Kuvenova O. The structure of the thyroid gland in rats after X-ray irradiation // Ukrainskiy zhurnal klinicheskoy i laboratornoy meditsiny. 2013. V. 8. № 1. P. 59–60.

22. *Коваленко А.Н.* Развитие синдрома инсулинорезистентности и его осложнений у участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС (по данным 24-летнего наблюдения после аварии на ЧАЭС) // Журнал нац. академии мед. наук Украины. 2012. Т. 18. № 1. С. 68–73.

Kovalenko A.N. The development of insulin resistance syndrome and its complications among participants in the liquidation of the aftermath of the Chernobyl NPP accident (according to 24-year observation after the Chernobyl NPP accident) // Zhurnal natsionalnoy akademii meditsinskikh nauk Ukrainy. 2012. V. 18. № 1. P. 68–73.

23. *Каминский О.В., Копилова О.В., Афанасьев Д.Е. и др.* Незлокачественные заболевания эндокринной системы через 30 лет после аварии на ЧАЭС // Проблемы эндокринной патологии. 2016. № 2. С. 22–32.

Kaminsky O.V., Kopilova O.V., Afanasyev D.E. et al. Nonmalignant diseases of the endocrine system after 30 years after the Chernobyl accident // Problemy endokrinnoy patologii. 2016. № 2. P. 22–32.

24. *Пишугина А.В., Иванов А.Г., Белякова Н.А.* Особенности заболеваемости работающих на предприятиях атомной промышленности // Проблемы соц. гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2013. № 1. С. 18–21.

Pishugina A.V., Ivanov A.G., Belyakova N.A. Features of incidence working at the enterprises of the nuclear industry // Problemy sotsialnoy gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny. 2013. № 1. P. 18–21.

25. *Савина Н.П., Дьякова А.М., Ляско Л.И.* Некоторые показатели липидов, гормонов крови, Т-клеточного звена

иммунитета у мышей с повышенной массой тела в отдаленный период после локального облучения тимуса, гипоталамуса-гипофиза и гонад // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36. Вып. 2. С. 278–282.

Savina N.P., Dyakova A.M., Lyasko L.I. Some indicators of lipids, blood hormones, T-cell immunity in mice with increased body weight in the long-term period after local irradiation of the thymus, hypothalamus-pituitary and gonads // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 1996. V. 36. Is. 2. P. 278–282.

26. *Ярилин А.А.* Система цитокинов и принципы ее функционирования в норме и при патологии// Иммунология. 1997. Т. 6. № 1. С. 7–14.

Yarilin A.A. The system of cytokines and the principles of its functioning in health and disease // Immunologiya. 1997. V. 6. № 1. P. 7–14.

27. *Рождественский Л.М.* Цитокины в аспекте патогенеза и терапии острого лучевого поражения // Радиационная биология. Радиоэкология. 1997. Т. 37. Вып. 4. С. 590–596.

Rozdenstvensky L.M. Cytokines in the aspect of pathogenesis and treatment of acute radiation damage // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 1997. V. 37. Is. 4. P. 590–596.

28. *Haveman J., Geerdink A., Rodermond H.* TNF, IL-1 and IL-6 in circulating blood after total-body and localized irradiation in rats // Oncol. Reports 1998. №5. P. 679-683.

29. *Chang C., Limanni A., Baker et al.* Sublethal gamma irradiation increases Il-1α, Il-6 and TNF-α mRNA levels in murine hematopoietic tissues // J. of Interferon and Cytocine Res. 1997. V. 17. P. 567–572.

30. *Gridlly D., Rizvi A., Makinde A. et al.* Space-relevant modifies cytokine profiles, signaling proteins and Foxp3 N-cells // Inter. J. Radiat. Biol. 2013. V. 89. № 1. P. 26–35.

31. *Mehrota Sh., Pecaunt M., Gridlly D.* Effect of minocycline on hematopoietic recovery after whol-body irradiated // In vitro. 2013. V. 27. № 1. P. 11–28.

32. *Калинина Н.М., Давыдова Н.И., Бычкова Н.В.* Показатели иммунитета у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС в отдаленный период // Мед. биол. и соц.-психол. проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2011. № 3. С. 58–62.

Kalinina N.M., Davydova N.I., Bychkova N.V. Indicators of immunity in liquidators of the consequences of the Chernobyl accident in the remote period // Meditsinskaya biologiya i sotsialno-psikhologicheskie problemy v ekstremalnykh situatsiyakh. 2011. № 3. P. 58–62.

33. *Тимошевский А.А., Гребенко А.Н., Калинина Н.М.* Состояние клеточного и цитокинового звеньев иммунитета у участников ликвидации последствий аварии на ЧАС через 10–12 лет после выхода из зоны повышенной радиационной опасности // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2001. Т. 46. № 4. С. 23–27.

Timoshevsky A.A., Grebenko A.N., Kalinina N.M. The state of cellular and cytokine immunity in participants in the liquidation of the consequences of an accident in the Chernobyl NPP 10–12 years after leaving the zone of increased radiation hazard // Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'. 2001. V. 46. № 4. P. 23–27.

Поступила 01.10.2018

ENTROPY INFORMATION ANALYSIS OF THE WHITE BLOOD PROFILE IN HELICOPTER PILOTS – PARTICIPANTS IN ELIMINATION OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER STATION ACCIDENT

Maltsev V.N., Ushakov I.B.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 43–48

The article discusses potentiality of the white blood entropy information analysis for the integral leukopoiesis assessment in helicopter pilots in 5 to 7 years since participation in elimination of the Chernobyl nuclear power station (CNPS) accident. The external radiation dose amounted to 0,2–0,3 Gy. The leukocyte level in peripheral blood in the delayed period was found to remain normal; however, changes in the relative cell content and, therefore, white blood entropy suggested impairment of leucopoiesis regulation. Values of these indices were above normal but not pathologic.

Key words: information analysis, entropy, leukopoiesis, helicopter pilot, external γ-exposure, blood count, Chernobyl nuclear power station.

УДК 613.6;625.098;656.7

АВИАЦИОННЫЙ ШУМ: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОФИЛАКТИКИ НЕЙРОСЕНСОРНОЙ ТУГОУХОСТИ У АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ

Шешегов П.М.[1], Зинкин В.Н.[1], Сливина Л.П.[2]

[1]Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО РФ, Москва
[2]Волгоградский государственный медицинский университет

E-mail: sheshegoff.pavel@yandex.ru

Профессиональная нейросенсорная тугоухость (НСТ) занимает особое место в структуре профессиональных заболеваний. На ее формирование существенное влияние оказывает спектральный состав шума. В работе показаны особенности формирования и профилактики НСТ при действии авиационного шума, который в силу своей специфики оказывает существенное влияние на развитие НСТ. Нейросенсорная тугоухость у авиационных специалистов имеет свои особенности, поэтому ее следует рассматривать как отдельную форму, обусловленную сочетанным действием шума и инфразвука. Защита от воздействия авиационного шума требует проведения работ по созданию нового класса средств индивидуальной защиты.

Ключевые слова: авиационный шум, инфразвук, нейросенсорная тугоухость, аудиометрия, профилактика.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 49–56.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-49-56

Актуальной проблемой в промышленности и на транспорте продолжает оставаться неблагоприятное действие шума. По распространенности среди производственных физических факторов шум занимает 1-е место (22 %). Воздействию шума с уровнем, превышающим предельно допустимый, в России подвергаются несколько миллионов человек. Среди профессиональных заболеваний нейросенсорная тугоухость (НСТ) занимает 1-е место, а ее доля в 2014 г. составила 59 %. Истинная распространенность профессиональной тугоухости среди рабочих шумовых профессий колеблется от 2,7 до 77 % в различных видах производства [1–3].

В России с ее огромными расстояниями воздушному транспорту отводится особая роль. Он занимает 2-е (после железнодорожного) место во всех видах транспорта в междугороднем сообщении. Ежегодно осваиваются новые воздушные линии, вводятся в строй новые и реконструируются действующие аэропорты.

В настоящее время примерно 2–3 % населения России подвержены воздействию авиационного шума (АШ), уровни которого превышают нормативные требования. По результатам социально-гигиенических исследований 72 % населения, проживающего на территориях около аэропортов, предъявляют жалобы на нарушение условий отдыха, труда и быта.

Результаты анкетирования авиационных специалистов (АС) Военно-воздушных сил (ВВС) показали, что наиболее значительным неблагоприятным фактором для них является шум. Эпидемиологические исследования выявили среди них высокий уровень НСТ [4–6].

Профессиональная нейросенсорная тугоухость (ПНСТ) – хроническое двустороннее заболевание внутреннего уха, развивающееся при воздействии производственных факторов акустической природы. До 2004 г. в качестве основной причины развития НСТ рассматривался только производственный шум. В соответствии с приказом Минздравсоцразвития РФ № 417н от 27.04.2012 г. в перечень вредных и опасных производственных факторов включен инфразвук (ИЗ) и определены профзаболевания, им обусловленные.

В настоящее время накоплено достаточное количество научных данных, указывающих на то, что при действии ИЗ критическими органами являются не только орган слуха, но и вестибулярный анализатор, центральная нервная и сердечно-сосудистая системы, органы дыхания [7, 8]. В то же время клиническая картина профессиональной НСТ инфразвукового генеза до конца не изучена и требует проведения дальнейших исследований.

Основной особенностью АШ является наличие в его спектре высокоинтенсивной инфразвуковой составляющей, действие которой не учитывалось при формировании авиационной патологии. Показано, что одновременное действие шума и ИЗ усугубляет патологическое действие каждого из этих факторов [9]. Поэтому изучение особенностей механизма действия и клинических проявлений патологии, обусловленной сочетанным действием высокочастотного шума и ИЗ, является актуальной задачей [10].

Ситуация усугубляется недостаточным обеспечением АС эффективными штатными средствами защиты от шума. В настоящее время в авиации применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ) от шума, предназначенные для защиты преимущественно воздушного пути проникновения АШ в орган слуха. В силу специфических особенностей, присущих АШ (высокая интенсивность, сочетания акустических колебаний звукового и инфразвукового диапазонов), использующиеся СИЗ от шума в государственной авиации РФ недостаточно эффективны [11].

Цель работы: показать особенности формирования и профилактики НСТ, обусловленной действием АШ.

Методика

Измерение акустических параметров на рабочих местах АС выполняли с помощью цифрового шумомера SVAN-945A (анализатор спектра шума 1-го класса). Прибор предназначен для акустических измерений, мониторинга шума окружающей среды и оценки уровней шума на рабочих местах в соответствии с ГОСТ 12.1.050–86. Гигиеническую оценку акустической обстановки на рабочих местах проводили с учетом циклограммы профессиональной деятельности и требований нормативных документов (санитарных норм СН 2.2.4/2.1.8.562–96, СН 2.2.4/2.1.8.583–96, СанПиН 2.2.4.3359–16). При определении класса условий труда (КУТ) руководствовались требованиями Руководства Р 2.2.2006–05 [12].

Заболеваемость АС оценивали по данным медицинской документации (отчеты, истории болезни и медицинские книжки). Заключение о наличии НСТ выносилось на основании клинического обследования ЛОР-специалиста и данных тональной аудиометрии (ТА).

Результаты и обсуждение

Основным источником шума на рабочих местах АС являются воздушные суда. Генерация шума в наземных условиях происходит за счет работы основных и дополнительных силовых установок воздушных судов, а также вспомогательного наземного оборудования (компрессоры, кондиционеры и др.). Шум в салоне во время полета обусловлен силовыми установками, бортовым оборудованием (кондиционеры, вентиляторы) и турбулентным пограничным слоем воздуха, образующегося вокруг планера.

В табл. 1 представлена характеристика акустической обстановки на рабочих местах инженерно-авиационных специалистов (ИАС) при обслуживании воздушных судов в наземных условиях, а также на рабочих местах летно-подъемного состава (ЛПС) во время полетов [10, 11, 13].

Из табл. 1 следует, что при проведении измерений на рабочих местах ИАС эквивалентный уровень звука колебался от 97 до 118 дБА, т.е. существенно превышал предельно допустимый уровень (ПДУ) – 80 дБА. Величина уровня звука достигала величин 109–129 дБА. Общий уровень ИЗ находился в диапазоне 91–109 дБ и превышал ПДУ (100 дБ).

На рабочих местах ЛПС акустические параметры были ниже: 96–104 дБА, 82–104 дБА и 96–100 дБ соответственно. Следовательно, наибольшей акустической нагрузке в течение рабочей смены подвергается ИАС.

Анализ акустических параметров при эксплуатации авиационной техники, представленных в табл. 1 и ранее опубликованных работах [10, 11], позволяет выделить следующие особенности АШ:

– широкополосный характер шума, спектр которого включает акустические колебания низко-, средне и высокочастотного звукового диапазона;

– наличие инфразвуковой составляющей;

– шум высокоинтенсивный, так как уровни звукового давления (УЗД) практически во всех октавных частотах превышали 100 дБ;

– спектр шума широкополосный, с наличием нескольких максимумов;

– шум непостоянный, так как периоды «активной» шумовой нагрузки чередовались с паузами от нескольких десятков минут до нескольких часов;

– наличие нескольких источников шума на рабочих местах.

В табл. 2 представлены обобщенные данные по классам условий труда на рабочих местах АС, из которой следует, что условия труда по шуму в большинстве случаев соответствовали «вредному» классу. По ИЗ они соответствовали «допустимому классу» у ЛПС и «вредному классу» у ИАС.

Таким образом, установлено, что на рабочих местах АС уровни шума значительно превышают ПДУ в звуковом и инфразвуковом диапазонах. Наличие в спектре АШ высокоинтенсивных инфразвуковых и акустических колебаний звукового диапазона представляет особый интерес для специалистов в области медицины труда, поскольку в доступной научной литературе сведений о сочетанном действии шума и ИЗ недостаточно. Неблагоприятная акустическая обстановка на рабочих местах АС создает условия для формирования НСТ.

Классическое описание патологических изменений при действии шума хорошо изложено в соответствующих руководствах по шуму и оториноларингологии [14, 15].

Профессиональная нейросенсорная тугоухость (ПНСТ) при воздействии производственного шума

Длительность развития заболевания органа слуха до появления клинических симптомов ПНСТ составляет не менее 5 лет. Вероятность развития

Таблица 1

Характеристика акустической обстановки на рабочих местах АС, создаваемой различными типами ВС ВВС

Вид авиации	Инженерно-авиационный состав			Летно-подъемный состав		
	Общий уровень ИЗ, дБ	Уровень звука, дБА	$L_{Аэкв}$, дБА	Общий уровень ИЗ, дБ	Уровень звука, дБА	$L_{Аэкв}$, дБА
ВС дальней авиации	91–101	118–122	98–117	98	96–97	96–97
ВС истребительно-бомбардировочной авиации	101–111	109–129	97–118	100	96–103	100–102
ВС военно-транспортной авиации	102–107	118–124	111–116	97	82–104	103–104
Вертолеты	103–109	116–123	109–115	96	86–103	99–101

Таблица 2

Обобщенные данные по классам условий труда на рабочих местах АС

Наименование специальности	Инфразвук	Шум
Инженерно-авиационный состав (ИАС)	3,1–3,3	3,4–4
Летно-подъемный состав (ЛПС)	2	3,3–3,4

нарушения слуха зависит от уровня шума и длительности стажа работы в условиях шума. Выделяют ауральные и экстрааауральные эффекты шума на организм. Они развиваются параллельно: вначале изменения слуха и вегетососудистые нарушения являются обратимыми и преходящими (временное смещение порогов слуха, колебания артериального давления). По мере увеличения стажа работы с шумом они становятся постоянными. Наиболее ранними жалобами при действии шума являются головная боль, шум в голове и ушах, раздражительность, нарушение сна. Постепенно работники начинают предъявлять жалобы на снижение слуха и наличие высокочастотного шума в ушах. На снижение слуха у человека обращают внимание окружающие в домашних условиях и на работе.

Отоскопическая картина при развитии ПСНТ не имеет характерных признаков. Для диагностики нарушения слуха ведущее место занимает тональная аудиометрия (ТА), которая позволяет выявить негативные шумовые эффекты еще на доклиническом этапе. Так, при исследовании слуха в расширенном диапазоне частот отмечается повышение порогов восприятия тональных сигналов в зоне 12–16 кГц.

На ранних этапах клиническая картина тугоухости характеризуется повышением порогов слуха в частотном диапазоне 3000 и 6000 Гц (наиболее выраженном, на частоте 4000 Гц). Такую характерную форму аудиограммы называют шумовой зубец (noise-notch). Этот признак применяется для дифференциальной диагностики НСТ вследствие других причин (ототоксические медикаменты, возрастные изменения) [16]. Относительно рано пороги слуха начинают повышаться и в частотном диапазоне 6000–8000 Гц. В начале формирования тугоухости повышение порогов слуха в этой области невелико (от 10 до 40 дБ). Постепенно повышение порогов тонального слуха распространяется на частотах 2000, 1000, позднее – 500 Гц. На более низких частотах (125 и 250 Гц), как правило, наблюдается более позднее и незначительное снижение слуха. Прогрессирование патологического процесса с распространением на речевые частоты наблюдается при стаже работы 20 лет и более. По мере увеличения стажа работы наибольшая потеря слуха остается в области высоких частот (4000–8000 Гц).

К особенностям клинических проявлений ПНСТ относятся медленное и прогрессирующее течение процесса с постепенным нарастанием тугоухости, повышение порогов слуха в области высоких частот, отсутствие «костно-воздушной диссоциации». На фоне нарушения слуха в клинической картине ПНСТ постепенно формируются экстрааауральные эффекты. Чаще всего нарастание степени тугоухости происходит параллельно с развитием вегетососудистой дистонии, сначала по гипотоническому, а затем по гипертоническому типу.

ПНСТ при действии АШ

Первые клинические симптомы ПНСТ появляются спустя 2 года после действия АШ, т.е. раньше, чем при воздействии производственного шума. Особенность течения заболевания характеризуется тем, что часто нарушению слуха предшествуют вегетососудистые нарушения. Характер жалоб при действии АШ практически не отличается от жалоб при

Таблица 3

Влияние стажа работы в условиях воздействия шума на снижение слуха у АС ВВС

Категория АС	Стаж работы в условиях воздействия шума (лет)	Снижение слуха (дБ) в частотном диапазоне			
		500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
ЛПС	5	9,7 ± 0,7 p < 0,001	7,6 ± 0,7 p < 0,001	7,5 ± 0,7 p < 0,001	10,2 ± 0,7 p < 0,001
	10	10,2 ± 0,5 p < 0,001	8,8 ± 0,5 p < 0,001	9,3 ± 0,5 p < 0,001	13,6 ± 0,5 p < 0,001
	15	11,3 ± 0,6 p < 0,001	9,6 ± 0,6 p < 0,001	10,3 ± 0,6 p < 0,001	15,3 ± 0,6 p < 0,001
	Свыше 15	13,0 ± 0,6 p < 0,001	11,4 ± 0,6 p < 0,001	11,6 ± 0,6 p < 0,001	18,5 ± 0,6 p < 0,001
ИАС	5	8,9 ± 1,6 p < 0,001	8,3 ± 1,6 p < 0,001	7,9 ± 1,6 p < 0,001	8,8 ± 1,6 p < 0,001
	10	11,8 ± 2,1 p < 0,001	10,0 ± 2,1 p < 0,001	8,5 ± 2,1 p < 0,001	10,3 ± 2,1 p < 0,001
	15	13,6 ± 1,5 p < 0,001	13,4 ± 1,5 p < 0,001	15,0 ± 1,5 p < 0,001	26,4 ± 1,5 p < 0,001
	Свыше 15	15,5 ± 1,2 p < 0,001	15,9 ± 1,2 p < 0,001	19,7 ± 1,2 p < 0,001	31,3 ± 1,2 p < 0,001

производственном шуме. Отоскопическая картина при развитии ПСНТ от АШ не изменяется. Методом тональной аудиометрии у АС выявлены особенности изменений порогов слуха, а именно отсутствие шумового зубца, нисходящий тип аудиограммы, отсутствие «костно-воздушного разрыва». Первые клинические признаки нарушения слуха по данным тональной аудиометрии появляются через 2 года работы в условиях шума в виде повышения порогов восприятия звуковых тонов в области 12–16 кГц.

В табл. 3 представлена динамика развития нарушения слуха у АС в зависимости от стажа работы с шумом.

Из табл. 3 следует, у ЛПС уже в течение 5 лет работы наблюдалось практически одинаковое повышение порогов слуха по всему диапазону исследуемых частот, что свидетельствовало о нарушении слуха с характерным рельефом ТА («плоская» аудиометрическая кривая с равномерным повышением порогов слуха по всему диапазону исследованных частот в пределах 7,5–10,2 дБ). С увеличением стажа работы (до 10, 15 и свыше 15 лет) наблюдалась тенденция к снижению слуха в частотном диапазоне 500–2000 Гц на 1,0–1,5 дБ через каждые 5 лет, на частоте 4000 Гц – на 3–5 дБ.

В этой связи при стаже работы свыше 15 лет рельеф ТА у ЛПС изменялся и приобретал «пологий» или «ступенчато нисходящий» характер, с максимальным повышением порогов восприятия звуков на частоте 4000 Гц (18,5 дБ).

Направленность изменений слуха у ИАС носила такой же характер, как у ЛПС, с тенденцией к более выраженному снижению слуха. Через 5 и 10 лет работы у ИАС наблюдалось повышение порогов слуха по всему частотному диапазону (на 7,9–8,9 и 8,5–11,8 дБ соответственно).

При стаже работы в условиях шума от 15 лет и более рельеф ТА у ЛПС и ИАС становился «пологим» или «ступенчато нисходящим», с максимальным повышением порога слуха на частоте 4000 Гц (до 26,4 и 31,3 дБ соответственно).

Таким образом, вероятность развития ПНСТ при воздействии АШ выше, при стаже свыше 15 лет. При продолжительности работы от 5 до 10 лет она соответствует оценкам стандарта ISO [17].

Клиническая картина экстраауральных эффектов при наличии ПНСТ в связи с воздействием АШ характеризуется большим многообразием сопутствующих синдромов и заболеваний: вестибулопатия, вегетососудистая дистония, заболевания органов дыхания и сердечно-сосудистой системы, т.е. сочетанием заболеваний, характерных как для воздействия шума, так и для ИЗ. Сосудистые и вегетативные нарушения развиваются параллельно с нарушением слуха, а в ряде случаев они могут предшествовать развитию НСТ [18, 19].

На основании вышеизложенного можно утверждать, что характер нарушения слуха, а также синдромы, обусловленные экстраауральным влиянием сочетанного действия шума и ИЗ, имеют ряд особенностей, которые позволяют выделить ПНСТ вследствие сочетанного действия шума и ИЗ в отдельную форму НСТ [18]. Клиническая картина ПНСТ при сочетанном воздействии шума и ИЗ имеет следующие особенности:

– уровень звука на рабочих местах превышает 90 дБ;

– наличие инфразвуковой составляющей, УЗД которой превышает 100 дБ;

– профессиональный стаж работы при действии АШ не менее 2 лет;

– постепенное нарастание степени тугоухости,

наблюдаемое в процессе диспансерного наблюдения по данным медицинской документации;

– нисходящий тип аудиограммы с равномерным повышением порогов восприятия звуков по всему диапазону исследуемых частот как в низкочастотном (125–500 Гц) диапазоне до 20 дБ, так и в высокочастотном (4000–8000 Гц) диапазоне – от 30 до 40 дБ;

– двустороннее поражение органа слуха; отсутствие костно-воздушной диссоциации и других причин снижения слуха;

– наличие экстраауральных заболеваний (центральной и вегетативной нервной систем, заболеваний органов дыхания, сердечно-сосудистой системы).

Эти особенности необходимо учитывать при решении клинико-экспертных вопросов о клинической связи НСТ с авиационной профессией.

Анализ литературы показывает, что вышеуказанные отличия НСТ, формируемой у АС, свойственны специалистам ряда других отраслей промышленности [7, 8, 13]. Одной из современных особенностей промышленных шумов является увеличение в спектре низкочастотных и инфразвуковых составляющих. Результаты акустических измерений показывают, что если уровни производственного шума составляют около 90–100 дБА, то в его спектре содержатся инфразвуковые частоты с уровнем звукового давления до 100–107 дБ. Источниками производственного шума с инфразвуковой составляющей с УЗД выше 100 дБ являются все виды транспорта (воздушный, железнодорожный, морской, речной и автомобильный) и многие виды промышленности (авиационная, строительная, металлургическая, горнодобывающая, газо- и нефтедобывающая и др.). В этой связи рабочие этих отраслей также могут подвергаться сочетанному воздействию шума и ИЗ с формированием особой формы тугоухости.

Многолетние исследования показали, что в производственных условиях отдельного фактора инфразвукового воздействия не встречается. Данные о неблагоприятном воздействии ИЗ на организм получены в экспериментах на животных (крысы, кролики, морские свинки). Повреждающие эффекты ИЗ на барабанную перепонку и среднее ухо впервые были описаны в 1976 г. [20]. Гистопатологические исследования среднего и внутреннего уха после воздействия интенсивного ИЗ (УЗД 150–170 дБ) на шиншилл показали негативное влияние кратковременного воздействия (7,5–10 мин) непрерывного и прерывистого ИЗ с частотой 1, 10 и 20 Гц [21]. Исследования обнаружили ряд патологических изменений, включающих разрыв барабанной перепонки, кровотечения из среднего уха, разрыв мембраны Рейсснера, признаки эндолимфатической водянки, потерю наружных волосковых клеток, повреждение сосудистой полоски.

В то же время результаты исследования влияния ИЗ при звуковом давлении 100 дБ не выявили значимого повреждающего эффекта на среднее или внутреннее ухо [22]. Однако 24-часовое воздействие ИЗ на шиншилл вызывало сдвиг порогов слуха на 10–20 дБ в частотном диапазоне от 2 кГц и ниже, подтвержденный методом регистрации коротколатентных стволомозговых слуховых вызванных потенциалов.

Потенцирующий эффект шума и ИЗ был выявлен в экспериментах на животных. Сочетание ИЗ и шума (с частотой 4 кГц при УЗД 108 дБ в течение 1,75 ч) вызывает в 2,4 раза большую потерю наружных волосковых клеток, чем указанный шум без ИЗ [23, 24].

Для ИЗ характерны экстраауральные эффекты. Воздействие низкочастотного звука и ИЗ вызывает в организме лабораторных животных нарушения регуляторных систем и метаболизма на клеточном и субклеточном уровнях. Существует 2 типа механизма повреждающего действия ИЗ: центральный механизм, связанный с «перевозбуждением» гипоталамо-гипофизарно-адреналовой системы, и местный, связанный с непосредственным воздействием на высокоорганизованные структуры мембранного и генетического аппаратов сенсорных клеток внутреннего уха [25, 26]. Критическими органами при воздействии ИЗ являются вестибулярный анализатор, центральная нервная система, сердечно-сосудистая система и органы дыхания [7, 8, 10, 27]. Обследование работающих в условиях воздействия производственного шума, в спектре которого преобладали низкочастотные акустические составляющие и ИЗ, показало наличие у них симптомов астеновегетативных и сосудистых нарушений, артериальной гипертензии, дисциркуляторной энцефалопатии, хронического бронхита, эмфиземы легких, офтальмопатии.

Приказом Минздравсоцразвития России № 417н от 27.04.2012 г. определены профессиональные заболевания (ПЗ), обусловленные воздействием ИЗ: двусторонняя НСТ, вестибулярный синдром, выраженные расстройства вегетативной нервной системы. К сожалению, этого клинического описания недостаточно для решения клинико-экспертных вопросов о связи вышеотмеченных заболеваний с профессиональной деятельностью в связи с отсутствием соответствующих методических рекомендаций. В основе рекомендаций по данному вопросу необходимо учитывать результаты клинических исследований, основанных на сочетанном воздействии эффектов производственного шума и ИЗ. Подобный подход позволит преодолеть критические рассуждения и предложения об исключении НСТ инфразвукового генеза из перечня ПЗ органа слуха [2].

Несмотря на существующую в РФ систему профилактики неблагоприятного действия шума на

организм летного и инженерного составов ВВС РФ, количество неблагоприятных эффектов на организм данного контингента не уменьшается. В значительной степени это связано с недостаточной эффективностью средств индивидуальной защиты (СИЗ) от шума. Ситуация усугубляется тем, что эффективность большинства СИЗ в 2 и более раз ниже того, чем это указано изготовителем [28].

Основой выбора СИЗ специалистов от шума является оценка акустической обстановки на их рабочем месте. В первую очередь это относится к таким параметрам, как уровень звука и спектр шума. С нашей точки зрения, специфические особенности АШ диктуют специфичность выбора СИЗ, которые должны обеспечить эффективную защиту от «костно-воздушного» пути проведения акустических колебаний к органу слуха, а также защиту тела и внутренних органов в целом.

В первом случае необходимо использовать противошумные наушники (до 100 дБА) и противошумный шлем (при интенсивности шума свыше 100 дБА).

В настоящее время в интересах ВВС разработаны и приняты для снабжения комплекты средств индивидуальной защиты СИЗ-1 и СИЗ-2 (приказ министра обороны РФ № 202 от 22.04.2015 г.). Они обеспечивают «шумопоглощающий» эффект в диапазоне 2000–8000 Гц от 20 до 42 дБ. Их применение позволит существенно снизить акустическую нагрузку, получаемую ИАС при обслуживании современной авиационной техники. Во втором случае надо применять «противошумовой» жилет. Это новое средство, позволяющее снизить акустическую нагрузку путем экранирования поверхности грудной клетки и брюшной полости. Испытания экспериментальных образцов показали целесообразность их использования [11].

Важная роль в обеспечении защиты от АШ принадлежит организационно-техническим мероприятиям по оптимизации условий труда (применение коллективных средств защиты от шума, снижение продолжительности пребывания в зоне высокоинтенсивного шума, чередование периодов работы и отдыха и др.).

Правильная организация комплекса лечебно-профилактических мероприятий, включающих предварительные и периодические медицинские осмотры, обследование и лечение в специализированных медицинских учреждениях, внедрение методических рекомендаций по экспертной оценке позволит снизить риск развития шумовой и инфразвуковой патологии у авиационных специалистов [4, 10, 11].

Выводы

1. Специфическими особенностями АШ являются его высокая интенсивность и наличие высокоинтенсивной инфразвуковой составляющей.

2. Сочетанное действие шума и ИЗ приводит к развитию особой формы НСТ. Она имеет характерные отличия от аудиометрических данных, наблюдаемых в условиях производственного шума, в спектре которого преобладают средне- и высокочастотные звуковые колебания.

3. Тональная аудиометрия является обязательным методом исследования для динамического наблюдения и выявления начальных признаков нарушения слуха у АС ВВС в целях своевременного и эффективного лечения, а также для экспертной оценки профессиональной пригодности данного контингента АС.

4. Средства индивидуальной защиты от АШ должны обеспечить защиту органа слуха через воздушный (ауральные СИЗ) и костный (противошумный шлем) пути проведения акустических колебаний, а также защиту области грудной клетки и брюшной полости (противошумовой жилет, являющийся индивидуальным экстрааауральным средством защиты).

Список литературы

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2014 году: Государственный доклад. М., 2015.

On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2014: State report. Moscow, 2015.

2. *Панкова В.Б.* Новые регламенты диагностики профессиональной тугоухости // Вестник оториноларингологии. 2014. № 2. С. 44–88.

Pankova V.B. New regulations for the diagnosis of occupational hearing loss // Vestnik otorinolaringologii. 2014. № 2. P. 44–88.

3. *Панкова В.Б., Федина И.Н., Волгарева А.Д.* Профессиональная нейросенсорная тугоухость: диагностика, профилактика, экспертиза. М., 2017.

Pankova V.B., Fedina I.N., Volgarev A.D. Professional sensorineural hearing loss: diagnosis, prevention, examination. Moscow, 2017.

4. *Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Шешегов П.М. и др.* Действие авиационного шума на орган слуха специалистов Военно-воздушных сил // Воен.-мед. журнал. 2009. № 3. С. 54–58.

Zinkin V.N., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. et al. Effect of aircraft noise on hearing specialists of the Air Force // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 2009. № 3. P. 54–58.

5. *Зинкин В.Н., Миронов В.Г., Солдатов С.К. и др.* Особенности патологического действия авиационного шума на орган слуха инженерно-технического состава авиации // Рос. оториноларингология. 2007. № 6. С. 69–74.

Zinkin V.N., Mironov V.G., Soldatov S.K. et al. Features of the pathological effect of aircraft noise on the hearing

organ of the aviation engineering staff // Rossiyskaya otorinolaringologiya. 2007. № 6. P. 69–74.

6. *Миронов В.Г., Солдатов И.К., Паневин П.А и др.* Ретроспективный анализ профессиональной тугоухости военнослужащих Воздушно-космических сил // Вестник Рос. Воен.-мед. академии. 2018. № 1 (61). С. 75–77.

Mironov V.G., Soldatov I.K., Panevin P.A. et al. Retrospective analysis of professional hearing loss of the military personnel of Aerospace Forces // Vestnik Rossiyskoy Voenno-meditsinskoy akademii. 2018. № 1 (61). P. 75–77.

7. *Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Куралесин Н.А. и др.* Инфразвук как фактор риска здоровью человека (гигиенические, медико-биологические и патогенетические механизмы). Воронеж, 1998.

Izmerov N.F., Suvorov G.A., Kuralesin N.A. et al. Infrasound as a factor of risk to human health (hygienic, medical-biological and pathogenetic mechanisms). Voronezh, 1998.

8. *Карпова Н.И., Малышев Э.Н.* Низкочастотные акустические колебания на производстве. М., 1981.

Karpova N.I., Malyshev E.N. Low-frequency acoustic oscillations in production. Moscow, 1981.

9. *Свидовый В.И., Ахметзянов И.М., Зинкин В.Н и др.* Влияние сочетанного шума и инфразвука на слуховой и вестибулярный анализаторы // Вестник Санкт-Петербургской гос. мед. академии им. И.И. Мечникова. 2006. № 3. С. 69–73

Svidovy V.I., Akhmetzyanov I.M., Zinkin V.N. et al. Influence of combined noise and infrasound on auditory and vestibular analyzers // Vestnik Sankt-Peterburgskoy gosudarstvennoy meditsinskoy akademii im. I.I. Mechnikova. 2006. № 3. P. 69–73.

10. *Жданько И.М., Зинкин В.Н., Солдатов С.К. и др.* Фундаментальные и прикладные аспекты профилактики неблагоприятного действия авиационного шума // Авиакосм. и экол. мед. 2014. Т. 48. № 4. С. 5–16.

Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S. K. et al. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aircraft noise // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2014. V. 48. № 4. P. 5–16.

11. *Солдатов С.К., Богомолов А.В., Зинкин В.Н. и др.* Средства и методы защиты от авиационного шума: состояние и перспективы развития // Там же. 2011. Т. 45. № 5. С. 3–11.

Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Zinkin V.N. et al. Means and methods of protection against aircraft noise: status and prospects // Ibid. 2011. V. 45. № 5. P. 3–11.

12. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

R 2.2.2006-05. Guidance on the hygienic assessment of factors of the working environment and the labor process. Criteria and classification of working conditions.

13. *Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Прокопенко Л.В.* Человек и шум. М., 2001.

Izmerov N.F, Suvorov G.A., Prokopenko L.V. People and noise. Moscow, 2001.

14. *Косарев В.В., Бабанов С.А.* Профессиональные болезни. М., 2010.

Kosarev V.V., Babanov S.A. Professional diseases. Moscow, 2010.

15. Оториноларингология: национальное руководство / В.Т. Пальчун, ред. М., 2008.

Otorhinolaryngology: national guidelines / V.T. Palchun, ed. Moscow, 2008.

16. *Coles R.R., Lutman M.E., Buffin J.T.* Clin. Otolaryngol. Allied Sci. 2000. Aug. 25 (4). P. 264–273.

17. ISO 1999:1990 Acoustics – determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. Geneva, 1990.

18. *Зинкин В.Н., Шешегов П.М., Чистов С.Д.* Клинические аспекты профессиональной сенсоневральной тугоухости акустического генеза // Вестник оториноларингологии. 2015. Т. 80. № 6. С. 65–70.

Zinkin V.N., Sheshegov P.M., Chistov S.D. Clinical aspects of professional sensorineural hearing loss acoustic Genesis // Vestnik otorinolaringologii. 2015. V. 80. № 6. P. 65–70.

19. *Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Дворянчиков В.В., Миронов В.Г.* Нейросенсорная тугоухость шумовой этиологии: диагностика, лечение и профилактика // Вестник Рос. воен.-мед. академии. 2015. № 2 (50). С. 60–66.

Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Dvoryanchikov V.V., Mironov V.G. Sensorineural hearing loss of a noise etiology: diagnosis, treatment and prevention // Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii. 2015. № 2 (50). P. 60–66.

20. Infrasound and low frequency vibration / W.Tempest, ed. 1976.

21. *Lim D.J., Dunn D.E., Johnson D.L., Moore T.J.* Trauma of the ear from infrasound // Acta Otolaryngol. 1982. V. 94. № 3–4. P. 213–231.

22. *Harding G.W., Bohne B.A., Lee S.C., Salt A.N.* Effect of infrasound on cochlear damage from exposure to a 4-kHz octave band of noise // Hear Res. Mar. V. 225. № 1–2. P. 128–138.

23. *Ерохин В.Н., Попова Т.М.* Гистохимические исследования рецепторных образований вестибулярного аппарата в ответ на инфразвуковое воздействие // Физические факторы производственной среды. Л., 1980. С. 28–30.

Yerokhin V.N., Popova T.M. Histochemical studies of receptor formations of the vestibular apparatus in response to infrasonic influence // Fizicheskie faktory proizvodstvennoy sredy. Leningrad, 1980. P. 28–30.

24. *Нехорошев А.С., Глинчиков В.В.* Механизм действия инфразвука на рецепторы ушного лабиринта // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1990. № 6. С. 39–42.

Nekhoroshev A.S., Glinchikov V.V. Mechanism of action of infrasound on receptors of ear labyrinth // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1990. № 6. P. 39–42.

25. *Мурзамадиева З.А.* Морфологические изменения во внутренних органах и головном мозге при воздействии производственного инфразвука: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Алмааты, 1996.

Murzamadieva Z.A. Morphological changes in the internal organs and the brain under the influence of industrial

infrasound: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata meditsinskikh nauk. Almaaty, 1996.

26. *Плужников Н.Н., Владимиров В.Г., Зинкин В.Н. и др.* Исследование некоторых механизмов повреждающих эффектов низкочастотных шумов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2001. Т. 41. № 1. С. 67–72.

Pluzhnikov N.N., Vladimirov V.G., Zinkin V.N. et al. Investigation of some mechanisms of the damaging effects of low-frequency noise // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2001. V. 41. № 1. P. 67–72.

27. *Зинкин В.Н., Свидовый В.И., Ахметзянов И.М.* Неблагоприятное влияние низкочастотных акустических колебаний на органы дыхания // Профилактическая и клиническая медицина. 2011. № 3 (40). С. 280–283.

Zinkin V.N., Svidovy V.I., Ahmetzyanov I.M. The adverse effect of low-frequency acoustic oscillations on the respiratory organs // Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina. 2011. № 3 (40). P. 280–283.

28. *Денисов Э.И., Морозова Т.В., Аденинская Е.Е., Курьеров Н.Н.* Проблема реальной эффективности индивидуальной защиты и привносимый риск для здоровья работников (обзор литературы) // Медицина труда и промышленная экология. 2013. № 4. С. 18–25.

Denisov E.I., Morozova T.V., Adeninskaya E.E., Kur'erov N.N. The problem of the real efficiency of individual protection and the introduced risk to workers' health (literature review) // Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 2013. № 4. P. 18–25.

Поступила 24.08.2018

AVIATION NOISE: FEATURES OF PROGRESSION AND PREVENTION OF SENSORINEURAL HEARING LOSS IN AIR FORCE AVIATION SPECIALISTS

Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 49–56

Occupational sensorineural loss of hearing (SNHL) occupies a particular place within the structure of occupational diseases. The disease is largely due to a specific noise spectrum. In aviators SNHL is induced by the combination of noise and infrasound and should be considered as a separate pathology that calls for the development of appropriate personal hearing protectors.

Key words: aviation noise, infrasound, sensorineural loss of hearing, combined exposure, audiometry, prevention.

УДК 159.91

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЕННО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ КУРСАНТОВ ВОЕННО-МОРСКОГО ИНСТИТУТА

Павлов К.И.[1], Сырцев А.В.[1], Мухин В.Н.[2], Архимук А.Н.[1], Михеев А.В.[1], Копытова Ю.С.[1], Хамитова Е.А.[1], Сысоев В.Н.[3], Петренко М.И.[1]

[1]Военно-морская академия, Санкт-Петербург
[2]Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург
[3]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

E-mail: youngexp@yandex.ru

Проведено исследование возможности использования электрофизиологических показателей для оценки военно-профессиональной адаптации курсантов военно-морского института. Обследуемые – курсанты 1-го курса Военно-морского института ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (n = 81), средний возраст 19,07 ± 0,77 года. Дополнительно были применены психологические методики, психофизиологические и физиологические пробы, электрофизиологические методы анализа вариабельности сердечного ритма и электроэнцефалографии. Установлены многочисленные связи между параметрами вариабельности сердечного ритма, активности сенсомоторной коры головного мозга, показателями когнитивных функций, выраженностью военно-профессиональной адаптации. Показано, что курсанты с высоким уровнем адаптации характеризуются высокой степенью развития пространственного восприятия, внимания, мышления, выраженной активностью сенсомоторной коры правого полушария головного мозга, высокими значениями общей спектральной мощности модуляций сердечного ритма и относительной мощности в диапазоне высоких частот.

Ключевые слова: когнитивные функции, адаптация, вариабельность сердечного ритма, ЭЭГ.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 57–66.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-57-66

Военно-профессиональная адаптация – это процесс психофизиологического приспособления первокурсника к условиям обучения в военном вузе и прохождения военной службы. Изучение адаптации индивида в эргатических системах является одной из важнейшей задач физиологии (психофизиологии) военного труда. Анализ исследовательских работ, имеющихся в литературе, показал, что исследований, посвященных комплексному изучению взаимосвязей военно-профессиональной адаптации, личностных особенностей, когнитивных функций, их центральных электрофизиологических проявлений и автономных регуляторных механизмов сердечной деятельности, играющих ключевую роль в физиологической адаптации, представлено недостаточно.

Анализ взаимосвязей вариабельности сердечного ритма (ВСР) и биоэлектрической активности коры головного мозга позволит существенно расширить возможности изучения механизмов военно-профессиональной адаптации. В пользу этого подхода свидетельствуют результаты исследования, в котором показано, что сердечная деятельность модулирует когнитивные функции, скорость сенсомоторных реакций, восприятие, познавательную активность через центростремительные нейроны, воспринимающие давление крови и имеющие рецепторы в сердце, каротидном синусе и дуге аорты [1]. Установлено, что центростремительные нейроны имеют функционально-морфологические проекции в спинном мозге, стволовых структурах головного мозга, гипоталамусе, таламусе, миндалинах и коре больших полушарий [2, 3]. Отмечается, что импульсы от этих нейронов передаются в таламус, который во многом определяет уровень активности коры головного мозга [4]. В ряде работ показана связь ВСР с функциями лобных долей головного мозга. Так, по данным функциональной магнитно-резонансной томографии установлено, что при ментальных и физических нагрузках происходит уменьшение кровотока в средней лобной извилине (поле Бродмана 8) вместе с увеличением частоты сердечных сокращений (ЧСС) [5]. Обнаружено, что амплитуда колебаний сердечного ритма с периодом 3 кардиоинтервала положительно связана с уровнем десинхронизации ЭЭГ в лобных отведениях. В других использованных отведениях подобная связь обнаружена не была, что исключает роль неспецифических активирующих систем мозга в реализации данной взаимосвязи [6]. Сниженные значения ВСР ассоциированы с замедлением времени реакции в психомоторных тестах и снижением эффективности их выполнения, что предположительно может

указывать на нарушение высших корковых функций памяти и внимания [7, 8].

Цель данной работы: изучить электрофизиологические характеристики военно-профессиональной адаптации курсантов 1-го курса военно-морского института.

Методика

Объектом исследования являлись добровольцы-курсанты Военно-морского института ВУНЦ ВМФ ВМА «Военно-морская академия» 1-го года обучения (n = 81), средний возраст которых составил 19,07 ± 0,77 года, без опыта военно-профессиональной деятельности. Все испытуемые были праворукими. Исследование проводилось в несколько этапов.

На 1-м этапе (август 2017 г.) с целью оценки уровня адаптированности к обучению было проведено исследование личностных особенностей и эффективности когнитивных функций. Для этого использовали следующие методы и методики: модифицированный индивидуально-типологический опросник (ИТО+), многоуровневый личностный опросник «Адаптивность» (МЛО), личностный профиль по Айзенку, маркеры большой пятерки (МБП), опросник военно-профессиональной мотивации (ВПМ), опросник жизнестойкости С. Мадди (ЖС), опросник доминирующих психических состояний по Л. Куликову (ДПС), модифицированный вариант теста включенных фигур Дж. Виткина (ПВ), аналогии, числовые ряды, память на фигуры, узоры, арифметический счет, установление закономерностей, силлогизмы, исключение слова.

На 2-м этапе (сентябрь 2017 г.) с этими же целями были использованы такие методики, как продвинутые прогрессивные матрицы Дж. Равена, 5 субтестов методики изучения особенностей мышления (МИОМ), тесты для оценки отдельных мыслительных операций – «Узоры» и «Кубы», кольца Ландольта, перепутанные линии, тесты для оценки свойств памяти – «Память на фигуры» и «Вербальная память».

На 3-м этапе в начале и конце 2017/2018 учебного года были реализованы референтометрические методы – групповая оценка личности (ГОЛ) и параметрическая социометрия, с целью оценки уровня адаптированности к служебной составляющей профессиональной деятельности, был проведен анализ обращаемости курсантов за медицинской помощью в течение учебного года.

На 4-м этапе (в течение 2017/2018 учебного года) с каждым испытуемым проводилась беседа о целях и содержании предстоящего электрофизиологического обследования, было получено добровольное согласие на его проведение. Задавались вопросы о самочувствии, качестве сна, определялись противопоказания к прохождению обследования по причине заболеваний. Оценивалось текущее нервно-психическое состояние с помощью 8-цветового теста М. Люшера. Проводились дыхательные пробы на задержку дыхания на вдохе (проба Штанге) и на выдохе (проба Генчи) (без физической нагрузки), с помощью спирометрии определялись жизненная емкость легких и дыхательный объем. Измерялись показатели физического развития: рост, масса тела, сагиттальная окружность головы, – а также пульс и артериальное давление. Длительность данного подготовительного периода составляла в среднем 30–35 мин.

Далее следовало собственно электрофизиологическое обследование, которое также проводилось индивидуально с каждым обследуемым в одно и то же время суток однократно (≈ в 15.00). Для регистрации сердечного ритма, ЭЭГ и фотоплетизмографии (ФПГ) использовался комплекс объективного психологического анализа и тестирования «Реакор» (НПКФ «Медиком МТД», г. Таганрог; частота дискретизации – 250 Гц). Сердечный ритм регистрировался электрокардиографически. Парные электроды для записи ЭКГ располагались на запястье левой руки и нижней трети шеи слева и кпереди от грудино-ключично-сосцевидной мышцы. Регистрировались статистические и спектральные характеристики ЭКГ: математическое ожидание мгновенной ЧСС – МОЧСС (уд/мин) МОЧСС = 60 000/RRNN, где RRNN – продолжительность последовательных RR-интервалов, мода – Мо (мс), амплитуда моды – АМо (%), стандартное отклонение RR-интервалов – SD, среднеквадратическое различие смежных RR-интервалов – RMSSD (мс), вариационный размах – ВР (с), индекс напряжения – ИН (%/с^2), общая спектральная мощность модуляций сердечного ритма – ТР (мс^2), относительная мощность в частотных диапазонах: высокой частоты (0,40–0,15 Гц) – HF (%), низкой частоты (0,15–0,04 Гц) – LF (%), очень низкой частоты (0,04–0,0033 Гц) – VLF (%), коэффициент вагосимпатического баланса – LF/HF (у.ед.). ЭЭГ регистрировалась в левом и правом центральных отведениях (С3 и С4), расположенных по стандартной системе 10–20 в симметричных точках правого и левого полушарий. Референтные электроды (А1, А2) располагались в области сосцевидных отростков. Величина подэлектродного сопротивления не превышала 10 кОм. Оценка уровня биоэлектрической активности сенсомоторной коры головного мозга проводилась по уровню десинхронизации ЭЭГ по каждому отведению, которая заключается в увеличении частоты и уменьшении амплитуды основных ритмов, и свидетельствует о возрастании функциональной активности коры и подкорковых образований головного мозга [16]. Вначале определялись относительные значения мощностей (ОЗМ) по основным зонам спектра ЭЭГ в каждом из отведений (в %),

далее выполнялась z-стандартизация показателей ОЗМ, полученных данных по формуле (1):

$$Z = \frac{x - x_{cp}}{\sigma}, \quad (1)$$

где Z – стандартизованное значение, в баллах; x – значение ОЗМ; x_{cp} – среднее арифметическое ОЗМ; σ – стандартное отклонение.

Уровни десинхронизации ЭЭГ в каждом из отведений определялись в соответствии со шкалой от 1 до 6 баллов. Уровень десинхронизации в 1 балл соответствовал преобладанию стандартизованного значения мощности ЭЭГ в дельта-1-диапазоне (0,50–2,0 Гц), 2 балла соответствовали дельта-2-диапазону (2,0–4,0 Гц), 3 балла – тета-диапазону (4,0–8,0 Гц), 4 балла – альфа-диапазону (8,0–13,0 Гц), 5 баллов – бета-1-диапазону (13,0–24,0 Гц), 6 баллов соответствовали частотной полосе бета-2 (24,0–35,0 Гц.). Таким образом, был применен интегральный подход к оценке суммарного уровня биоэлектрической активности мозга, основанный на определении уровня десинхронизации ЭЭГ, который успешно использовался в исследованиях [6, 9]. Датчик ФПГ закреплялся на среднем пальце левой руки (тип датчика – ИК отражающий, 950 нм). С помощью визуального анализа и компьютерной программы «Объективный психологический анализ и тестирование «Эгоскоп-2017» были выявлены и вручную удалены выраженные глазодвигательные и мышечные артефакты, единичные спайки и острые волны. Для подавления электрокардиографических, миографических и окулографических артефактов при выполнении когнитивных задач использовались такие функции программного обеспечения, как сглаживание и интерполяция выбросов и ошибочных данных. Исследование электрофизиологических проявлений когнитивных функций селективного внимания, рабочей памяти, пространственной ориентации, мышления проводилось на обследуемых, находящихся в положении сидя. Проведено 8 серий функциональных проб: 1) в состоянии покоя с закрытыми глазами; 2) в состоянии покоя с открытыми глазами; 3) в период выполнения теста «Красно-черные таблицы Шульте – Платонова» (7 х 7 ячеек); 4) во время выполнения теста «Часы с поворотом»; 5) в момент выполнения теста РДО (реакция на движущийся объект); 6) при предъявлении задачи «устный счет при закрытых глазах»; 7) в состоянии покоя с открытыми глазами после когнитивных функциональных проб (КФП); 8) в состоянии покоя с закрытыми глазами после КФП. Время регистрации электрофизиологических параметров в каждой серии – 5 мин. Общее время тестирования составляло в среднем 1 ч. Деление обследуемых на группы производилось с помощью автоматизированных нейронных сетей Кохонена с предшествующим преобразованием всех психологических, психофизиологических, антропометрических и электрофизиологических параметров в z-баллы. Сети Кохонена относятся к самоорганизующимся нейронным сетям, позволяющим выявлять кластеры (группы) входных векторов, обладающих общими свойствами. Использована однослойная сеть, построенная из 3 нейронов типа WTA (Winner Takes All — победитель получает все), в которой происходит обучение с помощью механизмов конкуренции и «без учителя». Результаты кластеризации верифицировались иерархическим кластерным анализом, а точность классификации подтверждалась дискриминантным анализом.

При проведении статистического анализа использовался расчет среднего значения и среднеквадратического отклонения. Все параметры проверялись на нормальность распределения. Определение статистической достоверности межгрупповых отличий между электрофизиологическими параметрами ВСР и ЭЭГ в разных сериях исследования проводилось с помощью однофакторного дисперсионного анализа с последующим апостериорным множественным сравнением (post-hoc) и поправкой на множественность сравнений по методу Бонферрони. Исследование взаимосвязей параметров в каждой группе и в каждой серии исследования проводилось с помощью корреляционного анализа Спирмена. Критериями достоверности результатов были: коэффициент корреляции r_s с соответствующим значением уровня достоверности ($p \leq 0{,}05$; $p \leq 0{,}01$; $p \leq 0{,}001$), построение скаттерограмм для визуального анализа репрезентативности корреляционных связей. Факторный анализ методом главных компонент (principal components) с ротацией факторов по методу varimax выполнен по всем сериям исследования и в каждой группе отдельно. Было выделено 3 группы обследуемых: 1-я группа – 24 человека, 2-я группа – 31 человек, 3-я группа – 26 человек, что в дальнейшем позволило установить наиболее существенные связи между параметрами ВСР и уровнями десинхронизации ЭЭГ и отличия в каждой из обследуемых групп.

Результаты и обсуждение

Выделенные группы характеризовались множеством достоверных отличий. Было установлено, что параметр «исполнительность» методики ГОЛ (баллы) достоверно выше в 1-й группе (4,56 ± 0,92), чем в 3-й (3,6 ± 1,33) ($F = 3{,}9$; $p \leq 0{,}05$). По шкале МИОМ «нахождение общности» определили достоверные отличия между 1-й и 3-й группами, причем эффективность выполнения этого теста у 3-й группы была достоверно ниже (57,05 ± 15,66), чем в 1-й (68,37 ± 15,07) ($F = 3{,}1$; $p \leq 0{,}05$); эффективность выполнения методики «Перепутанные линии» выше

в 1-й группе (81,78 ± 15,64), чем в 3-й (67,51 ± 20,75) (F = 3,1; p ≤ 0,05); эффективность арифметического счета выше во 2-й группе (55,32 ± 16,88), в сравнении с 3-й группой (44,94 ± 13,85) (F = 3,1; p ≤ 0,05). Таким образом, 1-я группа обследуемых характеризовалась более высоким уровнем исполнительности, более выраженным уровнем развития языково-логического мышления, языковой способности к абстрагированию, образованию понятий, вынесению суждений, а также высоким уровнем концентрации и устойчивости зрительного внимания. Вторая группа обследуемых отличалась высокой эффективностью выполнения простых арифметических действий и достаточно высоким уровнем развития счетных навыков.

В ходе выполнения психофизиологических тестов с одновременной регистрацией электрофизиологических показателей было показано, что в тесте «Часы с поворотом» испытуемые 1-й группы имеют меньшее «количество пропущенных заданий» (0,33 ± 0,66) по сравнению с 3-й (1,14 ± 0,89) (F = 4,3; p ≤ 0,01). Следовательно, курсанты 1-й группы, пропуская меньшее количество заданий в тесте «Часы с поворотом», выполняли его более эффективно, старательно и, предположительно, имели более высокий уровень развития восприятия и пространственной ориентации, а манипулирование объектами в пространстве являлось для них более простой когнитивной задачей в сравнении с курсантами 3-й группы. Индекс методики РДО «коэффициент баланса» был выше в 3-й группе (37,57 ± 81,32), чем во 2-й (5,08 ± 5,40) (F = 3,9; p ≤ 0,05). Достоверные отличия между 3-й (8,57 ± 12,62) и 2-й группами (3,42 ± 3,69) также наблюдались и по другому индексу методики РДО – коэффициенту реакции на движущийся объект (F = 3,3; p ≤ 0,05). Данные различия указывают на выраженное преобладание нервных процессов торможения у обследуемых 3-й группы. Жизненная емкость легких была больше у обследуемых 1-й группы (5,06 ± 0,53), чем у обследуемых 2-й группы (4,61 ± 0,61) (F = 3,2; p ≤ 0,05); масса тела достоверно меньше во 2-й (74,22 ± 7,39; F = 8,0; p<0,01) и 3-й группах (72,38 ± 7,31; F = 8,0; p ≤ 0,001) по сравнению с 1-й (81,14 ± 9,81); длина тела больше в 1-й (182,83 ± 6,43), чем в 3-й (177,31 ± 5,77) (F = 8,0; p ≤ 0,01). Следовательно, курсанты 1-й группы характеризовались более высоким уровнем физического развития, выражающемся в том числе, в более высоком уровне развития функции внешнего дыхания.

В табл. 1 показаны многочисленные достоверные межгрупповые отличия средних значений статистических параметров ВСР. Все показатели находились в пределах возрастной нормы [10]. Значения математического ожидания ЧСС было достоверно меньше в 1-й группе, чем во 2-й и 3-й группах в каждой серии исследования. Мода RR-интервалов во всех сериях была больше у курсантов 1-й группы в сравнении с курсантами 2-й и 3-й групп. Амплитуда моды статистически значимо различалась во всех обследуемых группах во всех сериях исследования и имела минимальные значения в 1-й группе, а максимальные – в 3-й, что отражает, согласно данным литературы, мобилизующее воздействие симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС) у курсантов 2-й и 3-й групп [10]. Это подтверждается и меньшими значениями вариационного размаха и индексов SD, RMSSD у курсантов 2-й и 3-й групп по сравнению с курсантами 1-й группы, а также согласуется с работами других авторов, где показано, что уменьшение значений статистических характеристик ВСР – SDNN и RMSSD с одновременным увеличением QTVI (QT – variability index) сопутствовало ухудшению выполнения когнитивных тестов (теппинг-теста и др.) и увеличению времени психомоторных реакций [11].

Индекс напряжения (ИН) регуляторных систем был выше во 2-й и 3-й группах, чем в 1-й, что в рамках концепции, предложенной В.В. Париным и Р.М. Баевским, свидетельствует о высокой степени централизации механизмов управления сердечным ритмом у курсантов этих групп в эмоционально значимой ситуации обследования, что отражает непродуктивный способ использования физиологических ресурсов организма [10]. В литературе имеются подтверждения возрастания ИН при психоэмоциональных перегрузках. Так, у предпринимателей, испытывающих постоянные психоэмоциональные нагрузки, отмечались более высокие значения индекса напряжения регуляторных систем по отношению к группе контроля. В этих выборках наблюдалось также смещение параметров вегетативного баланса в сторону повышения активности симпатического компонента спектра, оцениваемого по LF и отношению LF/HF, что указывало на напряжение функциональной активности нейровегетативной системы. По данным ВСР в сочетании с показателями струп-теста выявлено замедление скорости переработки неконгруэнтной информации при сохранении скорости и качества переработки конгруэнтной информации, что свидетельствовало о снижении эффективности внимания [12].

Данные спектрального анализа подтверждают достоверные межгрупповые отличия статистических характеристик ВСР. Из табл. 2 видно, что общая спектральная мощность (TP) ВСР была достоверно больше в 1-й группе, чем во 2-й и 3-й группах в каждой серии исследования. Не установили статистически значимых отличий этого показателя ВСР между 2-й и 3-й группами, за исключением серии с тестом РДО, где уровень значимости отличий достигал p ≤ 0,05. Относительная мощность высокочастотных колебаний сердечного ритма (HF) была

Таблица 1

Статистические характеристики ВСР у курсантов 3 групп в разных функциональных пробах

Индекс/ № группы	МОЧСС	Mo	AMo	SD	RMSSD	BP	ИН
	Фон с закрытыми глазами в начале						
1	65,04±8,01 (1-3***; F=21,7)	916,67±137,26 (1-3***; F=17,6)	29,13±6,44 (1-3***; F=34,0)	71,38±16,43 (1-3***; F=33,6)	69,46±22,9 (1-3***; F=51,3)	0,38±0,09 (1-3***; F=19,2)	46,88±20,63 (1-3***; F=21,2)
2	76,84±8,31 (2-1***; F=21,7)	784,68±87,01 (2-1***; F=17,6)	41,55±7,72 (2-1***; F=34,0)	46,58±10,77 (2-1***; F=33,6)	33,61±10,14 (2-1***; F=51,3)	0,29±0,05 (2-1***; F=19,2)	100,74±44,05 (2-1**; F=21,2)
3	80,62±9,14	748,08±91,9	49,42±11,38 (3-2**; F=34,0)	40,77±15,03	27,77±13,05	0,25±0,09	169,79±106,21 (3-2***; F=21,2)
	Фон с открытыми глазами в начале						
1	64,71±7,8 (1-3***; F=24,1)	935,42±146,69 (1-3***; F=19,7)	27,75±4,77 (1-3***; F=42,2)	73,38±14,98 (1-3***; F=41,9)	69,67±21,47 (1-3***; F=51,7)	0,4±0,08 (1-3***; F=31,4)	41,3±16,35 (1-3***; F=22,8)
2	77±8,39 (2-1***; F=24,1)	784,68±85,07 (2-1***; F=19,7)	41,65±8,64 (2-1***; F=42,2)	46,94±12,12 (2-1***; F=41,9)	33,06±11,54 (2-1***; F=51,7)	0,28±0,06 (2-1***; F=31,4)	108,13±60,55 (2-1***; F=22,8)
3	80,23±8,75	755,77±91,74	49,31±10,43 (3-2**; F=42,2)	41,12±12,93	28,38±13,81	0,24±0,08	164,4±91,27 (3-2**; F=22,8)
	Красно-черные таблицы Шульте – Платонова						
1	72,17±9,1 (1-3***; F=17,7)	843,75±121,42 (1-3***; F=16,5)	36,46±6,69 (1-3***; F=25,2)	58,75±15,64 (1-3***; F=21,6)	52,67±19,58 (1-3***; F=36,0)	0,33±0,1 (1-3***; F=12,1)	74,61±29,78 (1-3***; F=17,0)
2	81,26±6,08 (2-1***; F=17,7)	734,68±63,8 (2-1***; F=16,5)	44,48±9,02 (2-1**; F=25,2)	46,71±12,11 (2-1**; F=21,6)	30,45±7,82 (2-1***; F=36,0)	0,26±0,09 (2-1*; F=12,1)	132,54±65,03
3	85,04±8,44	709,62±74,52	56,04±12,78 (3-2*; F=25,2)	34,85±10,71 (3-2**; F=21,6)	23,38±9,59	0,21±0,07	236,6±159,03 (3-2***; F=17,0)
	Часы с поворотом						
1	69,42±8,11 (1-3***; F=26,2)	881,25±120,07 (1-3***; F=24,4)	28,5±6,37 (1-3***; F=30,8)	73,5±14,17 (1-3***; F=42,7)	60,17±19,04 (1-3***; F=56,2)	0,45±0,11 (1-3***; F=18,5)	40,64±19,49 (1-3***; F=28,2)
2	80,48±5,83 (2-1***; F=26,2)	744,35±60,11 (2-1***; F=24,4)	40,81±7,79 (2-1***; F=30,8)	51,45±9,21 (2-1***; F=42,7)	31,52±7,6 (2-1***; F=56,2)	0,35±0,11 (2-1**; F=18,5)	85,51±35,14 (2-1**; F=28,2)
3	83,77±8,16	721,15±79,9	48,5±12,09 (3-2**; F=30,8)	41,5±14,17 (3-2**; F=42,7)	24,42±9,65	0,27±0,08 (3-2**; F=18,5)	142,83±73,8 (3-2***; F=28,2)
	Реакция на движущийся объект						
1	64,63±8,18 (1-3*** ; F=28,7)	939,58±136,32 (1-3***; F=24,5)	30,71±5,8 (1-3***; F=36,2)	66,92±14,03 (1-3***; F=42,7)	72,67±22,01 (1-3***; F=58,0)	0,39±0,08 (1-3***; F=37,3)	47,26±25,27 (1-3***; F=29,5)
2	75,55±5,96 (2-1***; F=28,7)	799,19±70,56 (2-1***; F=24,5)	41,9±7,56 (2-1***; F=36,2)	47,03±10,61 (2-1***; F=42,7)	37,32±11,03 (2-1***; F=58,0)	0,29±0,06 (2-1***; F=37,3)	97,57±36,04 (2-1**; F=29,5)
3	79,92±7,98	755,77±78,84	49,92±10 (3-2***; F=36,2)	36,88±10,37 (3-2**; F=42,7)	28,19±12,22	0,23±0,06 (3-2**; F=37,3)	173,28±92,48 (3-2***; F=29,5)
	Устный счет при закрытых глазах						
1	69,92±9,01 (1-3***; F=25,0)	864,58±139,08 (1-3***; F=20,0)	29,79±5,85 (1-3***; F=25,7)	70±16,48 (1-3***; F=36,7)	57,58±17,81 (1-3***; F=60,0)	0,39±0,09 (1-3***; F=33,6)	51,52±29,88 (1-3***; F=26,9)
2	81,1±7,05 (2-1***; F=25,0)	737,9±65,79 (2-1***; F=20,0)	39,81±7,38 (2-1***; F=25,7)	49,9±9,21 (2-1***; F=36,7)	29,84±7,96 (2-1***; F=60,0)	0,29±0,05 (2-1***; F=33,6)	100,56±37,75 (2-1***; F=26,9)
3	84,65±7,04	705,77±66,45	45,88±10,14 (3-2*; F=25,7)	41,31±10,33 (3-2*; F=36,7)	24,38±7,66	0,24±0,05 (3-2*; F=33,6)	151,4±68,53 (3-2*; F=26,9)
	Фон с открытыми глазами в конце						
1	64,13±8,07 (1-3***; F=32,2)	947,92±138,3 (1-3***; F=27,0)	27,04±5,6 (1-3***; F=35,3)	80,17±18,05 (1-3***; F=35,8)	68,79±20,39 (1-3***; F=56,4)	0,44±0,09 (1-3***; F=28,0)	35,97±16,8 (1-3***; F=34,1)
2	75,77±6,58 (2-1***; F=32,2)	787,9±75,24 (2-1***; F=27,0)	36,9±6,51 (2-1***; F=35,3)	56,65±11,76 (2-1***; F=35,8)	35,42±10,53 (2-1***; F=56,4)	0,32±0,06 (2-1***; F=28,0)	78,05±29,13 (2-1***; F=34,1)
3	79,81±6,93	761,54±71,5	44,35±9,29 (3-2***; F=35,3)	46,62±13,29 (3-2*; F=35,8)	28,27±11,47	0,29±0,08	113,27±46,18 (3-2***; F=34,1)
	Фон с закрытыми глазами в конце						
1	64,54±8,22 (1-3***; F=19,0)	943,75±143,57 (1-3***; F=19,1)	27,54±5,36 (1-3***; F=13,6)	79,46±16,04 (1-3***; F=17,2)	67,08±20,36 (1-3***; F=34,2)	0,44±0,09 (1-3***; F=16,9)	36,38±16,03 (1-3***; F=11,9)
2	74,74±8,35 (2-1***; F=19,0)	802,42±89,29 (2-1***; F=19,1)	37,03±11,37 (2-1**; F=13,6)	58,26±18,18 (2-1*** F=17,2)	38,61±14,58 (2-1***; F=34,2)	0,34±0,09 (2-1***; F=16,9)	81,88±54,25 (2-1*; F=11,9)
3	78,08±7,57	771,15±77,36	43,04±12,95	50,77±19,16	30,62±14,17	0,29±0,1	119,78±87,3

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – p ≤ 0,05; ** – p ≤ 0,01; *** – p ≤ 0,001; 1–3 – достоверные отличия между 1-й и 3-й группами; 2–1 – достоверные отличия между 2-й и 1-й группами; 3–2 – достоверные отличия между 3-й и 2-й группами.

Таблица 2

Спектральные характеристики ВСР у курсантов 3 групп в разных функциональных пробах

Индекс/ № группы	TP	HF	LF	VLF	LF/HF
	Фон с закрытыми глазами в начале				
1	9734,46±4882,69 (1-3***; F=28,5)	46,34±16,60 (1-3***; F=14,6)	27,51±9,69 (1-3**; F=15,8)	26,14±11,60	0,71±0,43 (1-3***; F=10,5)
2	4085,32±2155,57 (2-1***; F=28,5)	27,93±10,94 (2-1***; F=14,6)	45,75±12,33 (2-1***; F=15,8)	26,33±12,34	2,05±1,26 (2-1***; F=10,5)
3	3257,35±2564,26	27,45±15,15	37,77±13,27 (3-2*; F=15,8)	34,77±16,31	2,13±1,65
	Фон с открытыми глазами в начале				
1	10536,04±4370,99 (1-3***; F=44,4)	44,11±21,20 (1-3***; F=11,3)	26,54±8,38 (1-3***; F=15,4)	29,36±18,60	0,84±0,60 (1-3***; F=9,8)
2	4244,94±1926,03 (2-1***; F=44,4)	26,14±12,34 (2-1***; F=11,3)	42,16±11,37 (2-1***; F=15,4)	31,71±12,27	2,17±1,48 (2-1**; F=9,8)
3	3306,35±2283,76	24,52±14,96	38,45±11,54	37,03±13,71	2,42±1,67
	Красно-черные таблицы Шульте – Платонова				
1	6597,25±4808,53 (1-3***; F=12,1)	40,00±13,21 (1-3***; F=15,1)	39,35±12,80 (1-3**; F=12,1)	20,64±11,68	1,16±0,66 (1-3**; F=10,9)
2	4127,35±2456,42 (2-1**; F=12,1)	24,16±11,24 (2-1***; F=15,1)	55,07±10,37 (2-1***; F=12,1)	20,77±8,94	3,08±2,14 (2-1***; F=10,9)
3	2250,31±1440,78	23,98±11,50	50,32±12,69	25,71±12,39	2,53±1,20
	Часы с поворотом				
1	10575,21±4389,20 (1-3***; F=33,4)	28,52±10,32 (1-3***; F=20,6)	40,43±9,06 (1-3**; F=9,9)	31,07±10,09	1,62±0,66 (1-3***; F=16,7)
2	5207,74±2225,99 (2-1***; F=33,4)	17,41±7,43 (2-1***; F=20,6)	51,05±8,77 (2-1***; F=9,9)	31,53±8,73	3,55±1,75 (2-1***; F=16,7)
3	3607,15±2705,87	15,08±5,55	49,22±9,67	35,71±10,29	3,69±1,50
	Реакция на движущийся объект				
1	8297,88±3622,81 (1-3***; F=38,6)	45,94±14,80 (1-3***; F=23,9)	31,25±10,03 (1-3***; F=9,3)	22,81±8,21 (1-3**; F=6,5)	0,80±0,45 (1-3***; F=10,9)
2	4088,74±1932,92 (2-1***; F=38,6)	26,32±12,73 (2-1***; F=23,9)	42,01±11,45 (2-1**; F=9,3)	31,66±12,07 (2-1**; F=6,5)	2,19±1,69 (2-1***; F=10,9)
3	2410,46±1399,58 (3-2*; F=38,6)	22,77±10,59	43,83±11,79	33,41±12,22	2,47±1,45
	Устный счет при закрытых глазах				
1	9334,63±4415,71 (1-3***; F=34,0)	31,32±12,35 (1-3***; F=14,7)	41,19±12,55 (1-3***; F=8,2)	27,51±13,44	1,61±1,01 (1-3***; F=12,1)
2	4523,97±1617,62 (2-1***; F=34,0)	18,28±9,08 (2-1***; F=14,7)	51,99±10,42 (2-1**; F=8,2)	29,73±12,51	3,61±2,07 (2-1***; F=12,1)
3	3265,35±1559,35	17,51±9,11	54,16±13,51	28,35±13,82	3,82±1,89
	Фон с открытыми глазами в конце				
1	12647,00±6033,93 (1-3***; F=29,7)	35,65±14,95 (1-3***; F=20,3)	34,33±12,03 (1-3*; F=7,6)	30,03±12,85	1,21±0,73 (1-3***; F=11,9)
2	6116,65±2806,09 (2-1***; F=29,7)	18,31±8,17 (2-1***; F=20,3)	46,76±11,03 (2-1***; F=7,6)	34,94±12,26	3,24±2,02 (2-1***; F=11,9)
3	4355,81±2653,35	18,49±10,01	44,06±13,19	37,45±15,20	2,99±1,68
	Фон с закрытыми глазами в конце				
1	12063,08±4596,13 (1-3***; F=15,2)	34,39±16,28 (1-3***; F=12,1)	32,48±10,76 (1-3*; F=8,0)	33,12±15,28	1,22±0,71 (1-3***; F=8,9)
2	6741,81±4690,18 (2-1***; F=15,2)	21,98±10,23 (2-1***; F=12,1)	44,74±11,04 (2-1***; F=8,0)	33,28±13,67	2,61±1,68 (2-1*; F=8,9)
3	5441,08±4144,65	17,81±10,34	41,63±12,66	40,56±14,39	3,29±2,43

выше в 1-й группе по сравнению со 2-й и 3-й группами во всех функциональных пробах. Исследования, проведенные в условиях орбитального полета на станции «Мир», свидетельствуют, что этот показатель связан с активацией синтеза ацетилхолина в мозге и отражает деятельность парасимпатического отдела ВНС [10, 13]. Высокий уровень индекса HF у курсантов 1-й группы как в состоянии покоя, так и при когнитивной нагрузке может являться свидетельством активации парасимпатического отдела ВНС. Напротив, показатель низкочастотных колебаний LF был ниже в 1-й группе, чем во 2-й и 3-й группах во всех сериях исследования. Установлено, что мощность низкочастотных колебаний LF зависит от влияния норадреналина на проводящую систему сердца и характеризует работу симпатического отдела ВНС [13]. Однако существуют исследования, указывающие на недостаточность экспериментальных данных для однозначного понимания вклада LF в модуляцию сердечного ритма симпатическим отделом ВНС [6].

Можно предположить, что высокие значения LF у курсантов 2-й и 3-й группы отражают преобладание модулирующего влияния на сердечный ритм симпатического отдела ВНС, что подтверждается более высокими значениями коэффициентов вагосимпатического воздействия на ритм сердца – LF/HF во 2-й и 3-й группах во всех сериях исследования. Это согласуется с исследованиями, в которых показано увеличение индекса вагосимпатического воздействия на сердечный ритм (LF/HF) у военнослужащих подразделений морской пехоты НАТО с посттравматическим стрессовым расстройством, а также с работами, демонстрирующими снижение высокочастотного компонента ВСР (HF) при выполнении когнитивных заданий на внимание в группе тревожных испытуемых [14, 15]. Низкие значения параметра HF наблюдались и в нашем исследовании у курсантов 2-й и в особенности 3-й групп во всех сериях. Можно предположить наличие низкого уровня стрессоустойчивости курсантов 2-й и 3-й групп.

Относительная мощность сверхнизкочастотных колебаний VLF у курсантов 1-й группы статистически значимо меньше, чем у курсантов 2-й и 3-й групп при выполнении теста РДО. Согласно литературным источникам, индекс VLF отражает активность гуморально-метаболических, в том числе гормональных механизмов регуляции сердечного ритма. Некоторые исследователи указывают на кортико-лимбическое происхождение VLF, что созвучно гипотезе Р.М. Баевского о двухконтурной системе управления сердечным ритмом [10, 16]. Предполагается, что у курсантов второй и третьей групп наблюдается повышение активности гуморально-метаболических механизмов регуляции ритма сердца через активацию гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы в ответ на стрессовую ситуацию обследования.

Уровень десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении в покое и при открытых глазах достоверно выше в 1-й группе (4,29 ± 1,49), чем во 2-й (2,97 ± 1,62) ($F = 4,8$; $p \leq 0,01$). В серии «Часы с поворотом» уровень десинхронизации в правом центральном отведении выше в 1-й группе (4,75 ± 1,36), не только в сравнении со 2-й (3,26 ± 1,79), но и с 3-й группой (2,96 ± 1,73) ($F = 8,4$; $p \leq 0,01$).

Получены множественные корреляции уровня десинхронизации ЭЭГ с параметрами ВСР в каждой группе и в разных сериях исследования (табл. 3). Больше всего таких корреляционных связей наблюдалось у курсантов 1-й группы (13 корреляций) в сравнении курсантами из 2-й (12) и 3-й групп (9). Количество корреляций уровня десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении с параметрами ВСР в 1-й группе (10) и во 2-й группе (10) было больше, чем в 3-й (2), в которой, напротив, отмечали больше количество связей параметров ВСР с электроэнцефалографическими индексами, полученными по левому центральному отведению (7). Можно предположить наличие дифференциальных отличий между исследуемыми группами в механизмах обработки информации, основанных на феномене динамической функциональной межполушарной асимметрии. Иными словами, залогом успешного выполнения когнитивных задач может являться активация коры правого полушария головного мозга. Различный характер связей ВСР с активностью коры правого и левого полушарий головного мозга при когнитивной нагрузке показан в работе, где установлено, что студенты гражданского ВУЗа с высокими результатами в решении когнитивных задач имели более выраженное увеличение индекса LF/HF в момент тестирования, причем динамика показателей RRNN, TP, HF и LF/HF была связана с динамикой межполушарной когерентности потенциалов бета-, тета- и альфа-диапазонов ЭЭГ, а низкая точность выполнения когнитивных тестов наблюдалась при более низком значении VLF [17].

Рассмотрим корреляции в наиболее отличающихся по характеру связей в 1-й и 3-й группах подробнее. В первой группе курсантов при фоновой записи электрофизиологических параметров с открытыми глазами обнаруживалась положительная связь уровня десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении с индексом напряжения регуляторных систем. Вместе с тем ИН и показатель LF у этой группы курсантов был самый низкий по сравнению со 2-й и 3-й группами, следовательно, имевшийся уровень мобилизации организма на этапе, предшествующем когнитивной нагрузке, свидетельствует об оптимальном функциональном состоянии для осуществления мыслительных операций по решению когнитивных задач в последующих

Таблица 3

Корреляционные связи показателей ВСР и уровней десинхронизации ЭЭГ

1-я группа	2-я группа	3-я группа
Фон с закрытыми глазами в начале		
###	C3-SD (r_s = -0,42; p≤0,05) C3-TP (r_s = -0,46; p≤0,01)	C3-SD (r_s = -0,42; p≤0,05)
Фон с открытыми глазами в начале		
C4-AMo (r_s= 0,67; p≤0,001) C4-SD (r_s= -0,66; p≤0,01) C4-RMSSD (r_s= -0,53; p≤0,01) C4-BP (r_s= -0,46; p≤0,05) C4-ИН (r_s= 0,60; p≤0,01) C4-TP (r_s= -0,58; p≤0,01)	C4-Mo (r_s= -0,40; p≤0,05) C4-AMo (r_s= 0,46; p≤0,01) C4-SD (r_s= -0,55; p≤0,01) C4-RMSSD (r_s= -0,39; p≤0,05) C4-BP (r_s= -0,57; p≤0,001) C4-ИН (r_s= 0,54; p≤0,01) C4-TP (r_s= -0,51; p≤0,01)	C3-BP (r_s= -0,40; p≤0,05) C3-TP (r_s= -0,40; p≤0,05)
Часы с поворотом		
C3-BP (r_s= 0,50; p≤0,01)	###	C3-VLF (r_s = 0,40; p≤0,05) C4-LF (r_s= -0,62; p≤0,01) C4-VLF (r_s= 0,61; p≤0,001)
Реакция на движущийся объект		
C4-МОЧСС (r_s= -0,42; p≤0,05)	C4-AMo (r_s= 0,36; p≤0,05) C4-RMSSD (r_s= -0,41; p≤0,05)	C3-VLF (r_s= -0,40; p≤0,05)
Устный счет при закрытых глазах		
C4-HF (r_s= 0,42; p≤0,05)	###	C3-МОЧСС (r_s= -0,45; p≤0,05) C3-Mo (r_s= 0,40; p≤0,05)
Фон с открытыми глазами в конце		
###	C4-SD (r_s= -0,39; p≤0,05)	###
Фон с закрытыми глазами в конце		
C3-МОЧСС (r_s= -0,43; p≤0,05) C3-Mo (r_s= 0,42; p≤0,05) C4-МОЧСС (r_s= -0,44; p≤0,05) C4-Mo (r_s= 0,49; p≤0,05)	###	###

сериях исследования. В серии «Устный счет при закрытых глазах» в 1-й группе была обнаружена положительная корреляция уровня десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении с показателем HF. Это позволяет предположить, что чем выше уровень активности парасимпатической ВНС, тем выше активность сенсомоторной коры головного мозга и в центральных ассоциативных зонах коры правого полушария. Это подтверждает наше предположение о том, что активация коры правого полушария головного мозга приводит к улучшению качества решения когнитивных задач и функционально связана с увеличением влияния на сердечный ритм парасимпатической ВНС. Напротив, в 3-й группе обследуемых были установлены отрицательные корреляции уровня десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении и показателя LF при выполнении задания «Часы с поворотом». Следовательно, высокая активация симпатического отдела ВНС у курсантов этой группы связана с уменьшением уровня активности сенсомоторной коры правого полушария и затрудняет решение задач на пространственную ориентацию. Также обращает на себя внимание имевшиеся положительные корреляции уровня десинхронизации ЭЭГ в обоих полушариях с показателем VLF при решении той же задачи и отрицательной корреляции VLF с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом полушарии в серии РДО. Это может являться доказательством того, что низкий уровень активации коры и эффективности решения когнитивных задач сопровождается гормональным дисбалансом, инициированным стрессовой ситуацией обследования с дифференцированной по сложности когнитивной нагрузкой. Эти выводы согласуются с данными литературы, показывающими, что низкая мощность HF, полученная в группе курсантов 3-й группы, связана со стрессом, паническими атаками и тревожностью, а снижение активности блуждающего нерва, модулирующего ВСР, сочетается с низкой эффективностью когнитивных функций и работой исполнительных центров префронтальной коры головного мозга [18]. Возрастание показателя LF и снижение HF сочетается с существенными изменениями показателей внимания, памяти, принятия решений, тревожности, биохимических показателей крови (глюкозы) и ее уровня оксигенации, температуры тела, характера активации коры у военнослужащих при

Таблица 4

Факторная структура показателей ВСР и уровней десинхронизации ЭЭГ сенсомоторной коры у курсантов 1-й группы

Показатель/ № фактора	Факторы		
	1	2	3
SD	0,967	0,031	0,025
TP	0,945	0,015	0,041
AMo	– 0,894	0,072	– 0,044
ИН	– 0,892	0,009	– 0,297
BP	0,869	0,069	0,177
RMSSD	0,768	– 0,530	0,164
HF	0,018	– 0,969	– 0,068
LF/HF	– 0,006	0,916	– 0,122
LF	– 0,126	0,700	– 0,224
VLF	0,089	0,558	0,281
МОЧСС	– 0,458	0,215	– 0,728
Mo	0,409	– 0,211	0,726
C4	– 0,219	0,055	0,628
C3	0,140	0,083	0,593

моделировании боевых действий. Исследователи утверждают, что психоэмоциональное напряжение в таких условиях приводит к выраженному психофизиологическому ответу организма на стресс, вызывающему селективные нарушения памяти, которые зависят от характера боевой задачи с разным уровнем витальной угрозы [19]. Поэтому изменения спектральных характеристик ВСР могут использоваться в качестве прогностических маркеров нервно-психической устойчивости.

Факторный анализ параметров ВСР с активностью сенсомоторной коры головного мозга в каждой группе испытуемых показал трехфакторную структуру связей для каждой из групп. Наиболее важными для рассмотрения являются результаты факторного анализа параметров 1-й группы (критерии Кайзера – Мейера – Олкина = 0,72; сферичности Бартлетта = 0,001) (табл. 4). В третий фактор с максимальным весом вошли математическое ожидание ЧСС (-0,728) и мода наиболее встречающихся значений RR-интервалов (0,726), а также уровни десинхронизации ЭЭГ, оцененные в правом (0,628) и левом центральных отведениях (0,593).

Таким образом, курсанты 1-й группы отличаются высоким уровнем активации сенсомоторной коры головного мозга, ваготоническими изменениями сердечного ритма и более высоким уровнем развития когнитивных функций. Это подтверждается исследованиями, демонстрирующими связь параметров ВСР с механизмами долговременной памяти в рамках сомнологических исследований. Так, увеличение индекса HF в течение сна отражает работу механизмов консолидации следов памяти и активацию ассоциативных процессов в мозге [20].

Выводы

1. Выявлены многочисленные взаимосвязи параметров вариабельности сердечного ритма и активности сенсомоторной коры головного мозга, зависящие от уровня военно-профессиональной адаптации и развития когнитивных функций.

2. Первая группа обследуемых характеризовалась высоким уровнем военно-профессиональной адаптации, физического развития, развития когнитивных функций внимания и мышления, выраженной активацией сенсомоторной коры правого полушария головного мозга, высокими значениями общей спектральной мощности модуляций сердечного ритма и относительной мощности в диапазоне высоких частот (HF). Курсанты 1-й группы имели самые многочисленные корреляционные связи между активностью сенсомоторной коры и вариабельностью сердечного ритма.

3. Вторая группа отличалась средним уровнем военно-профессиональной адаптации, высоким уровнем развития счетных навыков, низким уровнем биоэлектрической активности сенсомоторной коры головного мозга и общей спектральной мощности модуляций сердечного ритма, высокими значениями относительной мощности в диапазоне низких частот (LF).

4. Третья группа обследуемых показывала низкий уровень военно-профессиональной адаптации, развития когнитивных функций восприятия, ориентации в пространстве, внимания и мышления, характеризовалась высокими значениями показателя LF, низким уровнем активности сенсомоторной коры головного мозга, вероятно сочетавшимися с дисбалансом в работе гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы в ситуации обследования, демонстрируя низкий уровень стрессоустойчивости.

Список литературы

1. *Lacey B.C., Lacey J.I., Obrist P.A. et al.* Studies of heart rate and other bodily processes in sensorimotor behavior // Cardiovascular psychophysiology: current issues in response mechanisms, biofeedback, and methodology. Chicago, 1974. P. 538–564.

2. *McCraty R., Shaffer F.* Heart rate variability: new perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk // Glob. Adv. Health Med. 2015. V. 4. № 1. P. 46–61.

3. *Armour J.A., Ardell J.L.* Peripheral autonomic neuronal interactions in cardiac regulation // Neurocardiology. N.Y., 1994. P. 219–244.

4. *Wölk C., Velden M.* Revision of the baroreceptor hypothesis on the basis of the new cardiac cycle effect // Psychobiology: issues and applications. Amsterdam, 1989. P. 371–379.

5. *Critchley H.D., Corfield D.R., Chandler M.P. et al.* Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans // J. Physiol. 2000. V. 523. № 1. P. 259–270.

6. *Mukhin V.N., Yakovlev N.M., Klimenko V.M.* An association between heart rate variability and levels of frontal cortex activation // Neurosci. and Behav. Physiol. 2013. V. 43. № 6. P. 755–759.

7. *Mahinrad S., van Heemst D., Macfarlane P.W. et al.* Short-term heart rate variability and cognitive function in older subjects at risk of cardiovascular disease // J. Hypertens. 2015. V. 33. DOI: 10.1097/01.hjh.0000467497.22224.3b.

8. *Mahinrad S., Jukema J.W., van Heemst D. et al.* 10-Second heart rate variability and cognitive function in old age // Neurol. 2016. V. 86. № 12. P. 1120–1127.

9. *Pavlov K.I., Mukhin V.N., Kamenskaya V.G., Klimenko V.M.* Dependence of cerebral-cortex activation in women on environmental factors // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 7. P. 737–744.

10. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В.* Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.

Bayevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V. Analysis of heart rate variability when using various electrocardiographic systems (methodological recommendations) // Vestnik aritmologii. 2001. № 24. P. 65–87.

11. *Stenfors C.U., Hanson L.M., Theorell T., Osika W.S.* Executive cognitive functioning and cardiovascular autonomic regulation in a population-based sample of working adults // Front Psychol. 2016. V. 7. P. 1536.

12. *Сидоренко Г.И., Комиссарова С.М.* Оценка объективных критериев фаз стрессовой реакции при разных уровнях адаптации // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2008. Т. 7. № 1. С. 91–97.

Sidorenko G.I., Komissarova S.M. Objective criteria for stress reaction phases at various adaptation levels // Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika. 2008. V. 7. № 1. P. 91–97.

13. *Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V. et al.* Heart rate variability method in the study of cognitive functions and military occupational adaptation // Med. Academic J. 2017. V. 17. № 4. P. 7–16.

14. *Minassian A., Maihofer A.X., Baker D.G. et al.* Association of predeployment heart rate variability with risk of postdeployment posttraumatic stress disorder in active-duty marines // JAMA Psych. 2015. V. 72. № 10. P. 979–986.

15. *Gazzellini S., Dettori M., Amadori F. et al.* Association between attention and heart rate fluctuations in pathological worriers // Front Hum. Neurosci. 2016. V. 10. P. 648.

16. *Mashin V.A.* Dependency of characteristics of heart rate variability on the average value of the R-R-intervals // Neurosci. and Behav. Physiol. 2002. V. 88. № 7. P. 851–855.

17. *Dzhebrailova T.D., Korobeinikova I.I., Karatygin N.A., Dudnik E.N.* Dynamics of EEG α activity and heart rate variability in subjects performing cognitive tests // Human Physiol. 2015. V. 41. № 6. P. 599–610.

18. *McCraty R., Atkinson M., Tomasino D., Bradley R.T.* The coherent heart: heart-brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order. Boulder Creek. CA, 2009.

19. *Delgado-Moreno R., Robles-Pérez J.J., Clemente-Suárez V.J.* Combat stress decreases memory of warfighters in action // J. Med. Syst. 2017. V. 41. № 8. P. 124.

20. *Whitehurst L.N., Cellini N., McDevitt E.A. et al.* Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2016. V. 113. № 26. P. 7272–7277.

Поступила 22.10.2018

ANALYSIS OF INFORMATIVITY OF ELECTROPHYSIOLOGICAL DATA IN CONTEXT OF RATING MILITARY OCCUPATIONAL ADAPTATION OF NAVAL SCHOOL STUDENTS

Pavlov K.I., Syrtsev A.V., Mukhin V.N., Arkhimuk A.N., Mikheev A.V., Kopytova Yu.S., Khamitova E.A., Sysoev V.N., Petrenko M.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 57–66

Benefits from the use of electrophysiological data for rating the military occupational adaptation of naval school students (n = 81, 19.07 ± 0.77) were assessed based on psychological, psychophysiological and physiological testing, heart rate variability (HRV) analysis and electroencephalography. Multiple correlations were established between HRV, activity of the brain sensorimotor cortex, cognitive functions and level of military occupational adaptation. Students with a high adaptation level demonstrated spatial perception, concentration, thinking, high activity of the sensorimotor cortex in the right hemisphere, and high total and relative high-frequency powers of heart rate modulations.

Key words: cognitive functions, adaptation, heart rate variability, EEG.

УДК 796.015+331.452

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ТРАВМАТИЗМА У СПОРТСМЕНОВ

Королёв В.А.[1], Калинкин Л.А.[2], Иванов И.В.[3, 4]

[1]НП «Испытательная лаборатория спортивно-технических изделий "ВИСТИ"», Москва
[2]Федеральный научный центр физической культуры и спорта Министерства спорта Российской Федерации, Москва
[3]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский университет)
[4]Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации, Санкт Петербург

E-mail: sunday123@mail.ru; ivanov-iv@yandex.ru

Возрастающая сложность задач по обеспечению безопасности спортивной подготовки (СП) требует проведения поисковых научных исследований в смежных областях разработки терминологии. В ходе проведенного анализа выделены элементы системы спортивной подготовки, определяющие ее безопасность: 1) функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена; 2) техника выполнения спортивных упражнений; 3) тактика и командное взаимодействие; 4) экипировка, оборудование, инвентарь; 5) спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды; 6) психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивная гигиена. Определены уровни безопасности (опасности) СП: безопасная, небольшая опасность, опасная, повышенная опасность, экстремально опасная. Обосновано, что комплексный подход к обеспечению безопасности СП предполагает использование метода поэлементного структурирования СП, что позволяет детально оценивать функционирование и механизмы взаимодействия отдельных элементов этой системы между собой и на этой основе разрабатывать нормы и правила обеспечения безопасных условий, организации и проведения СП. Предложенный метод и критерии комплексного подхода направлены на повышение эффективности научного и практического взаимодействия специалистов разных отраслей при планировании мероприятий по обеспечению безопасности СП.

Ключевые слова: здоровье спортсменов, спортивная подготовка, элементы системы спортивной подготовки, критерии безопасности, уровни безопасности (опасности), повышение уровней безопасности, системный подход.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 67–75.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-67-75

Повышение спортивных результатов требует увеличения скорости, силы, мощности при выполнении спортивных упражнений [1]. В то же время силовые воздействия при этом, превышающие границы физиологической сопротивляемости тканей организма, могут приводить к разрушению их структуры и нарушению функций. В связи с этим спорт как специфический вид активной деятельности всегда был и остается травмоопасным.

Существуют различные подходы к оценке критериев безопасности в спорте. С одной стороны, необходимо руководствоваться оценкой тяжести возможных последствий (качественный признак), так как вероятность причинения прямого или косвенного ущерба (количественный признак) носит субъективный характер. Субъективность причин травматизма обусловлена готовностью участников спортивной подготовки (СП) к соблюдению правил безопасности, знанию этих правил и объективных рисков.

С другой стороны, при отнесении одних видов спорта к безусловно опасным, а других – к безопасным важно учитывать не только предполагаемую тяжесть последствий, но и их частоту. Так, Советом национальной безопасности США проанализировано число получивших травмы при занятиях тем или иным видом спорта на каждые 1000 человек [2]. Травма определялась как ранение или ухудшение здоровья, при котором спортсмен оказывался нетрудоспособным в течение хотя бы одного дня. На 1-м месте по травматизму стояли не такие активные или агрессивные виды спорта, как борьба, бокс, футбол, хоккей и, как ни странно, бег. Показано, что среди поклонников бега, каждую неделю пробегающих по 30–39 миль (48,2–62,7 км), травмы получили 461 на каждые 1000 человек. Бег на 20–29 миль (32,2–46,6 км) в неделю привел к травмам у 384 человек. Среди тех, кто пробегал до 19 миль (до 30,6 км) в неделю, страдали от травм 294 человека. Среди увлекающихся прочими видами спорта количество получивших травмы из расчета на 1000 человек было ниже на порядок: бейсбол – 27,67; футбол – 27,50; борьба – 27,37; теннис – 23,14; регби – 23,14; баскетбол – 22,04; хоккей – 12,46; бокс

– 11,34; велосипед – 11,30; гимнастика – 7,13; волейбол – 4,43; лыжи – 3,44; сноуборд – 2,86; коньки – 2,79; гандбол – 2,42; водные лыжи – 1,90; рыбалка – 1,37; плавание – 1,30; гольф – 1,13; хождение на шлюпках – 0,92; гребля – 0,92; стрельба из лука – 0,66; пейнтбол – 0,31. Как видно из приведенных данных, даже самые традиционные виды спорта, не относящиеся к разряду экстремальных, могут быть травмоопасны, так как приводят к большому количеству травм, даже если только небольшая часть из них имеет серьезные последствия.

В качестве критерия безопасности рассматривается и подверженность спортсменов широкому кругу патологических изменений в организме, связанных с состоянием перенапряжения в процессе тренировочной соревновательной деятельности. Спорт всегда несет в себе элемент риска, кроме того, большой ущерб здоровью могут приносить интенсивные тренировки и соревновательные нагрузки, превышающие биологические возможности организма человека [3]. Опубликованные в отечественной и зарубежной литературе сообщения о случаях внезапной смерти спортсменов, в том числе мужчин работоспособного возраста, позволяют полагать, что специфическое нарушение сердечной деятельности есть следствие тяжелых и сверхтяжелых нагрузок физического и эмоционального характера у лиц, занятых в профессиональном спорте. Установлено, что наиболее частой причиной профессиональных заболеваний и внезапной смерти у атлетов являются нераспознанные заболевания сердечно-сосудистой системы. Чаще всего внезапная смерть настигает спортсменов во время занятий безопасными на первый взгляд видами спорта – бег, игра в теннис, футбол и баскетбол.

Об уязвимости спортсменов для сердечно-сосудистых заболеваний свидетельствуют данные анализа состояния здоровья 798 атлетов в возрасте от 35 лет до 81 года, которые занимались спортом средней и высокой физической степени активности не менее 3 дней в неделю [4]. Участники ответили на ряд вопросов о здоровье, семейной медицинской истории и занятиях спортом, у них измерили кровяное давление и провели коронарную ангиографию. В итоге у 11,4 % лиц выявили признаки сердечно-сосудистых заболеваний, а у 10 спортсменов — выраженные нарушения функций коронарных артерий, у 81 человека эти нарушения были без клинических выраженной симптоматики. Сделано заключение, что физическая активность хотя и помогает профилактике заболеваний сердца, однако чрезмерные нагрузки могут нанести серьезный вред здоровью.

Опасность СП может зависеть от различных ее элементов: техники и тактики выполнения спортивного упражнения, исправности оборудования и инвентаря, технического состояния спортивного объекта, физического состояния организма спортсмена и многих других факторов. Так, технические средства и методы, применяемые в спортивном состязании и тренировках, обеспечивают концентрацию физических способностей спортсмена, иногда повышая их до уровня опасного для многих органов и систем организма. Одновременное нахождение на спортивной площадке нескольких спортсменов, выполняющих упражнения на пределе своих физических возможностей, условия окружающей среды, тактические приемы, психофизическое состояние спортсменов, строгий ограничительный режим, состояние спортивного оборудования и инвентаря, способы организации спортивной подготовки – все может стать причиной непредсказуемых последствий для здоровья участников СП.

Основными причинами травматизма являются выполнение спортивного упражнения на пределе физических способностей спортсмена и состояние материально-технического обеспечения, но эти факторы в редких случаях становятся единственной причиной ущерба. Практически всегда это результат критических совпадений при функционировании различных элементов СП, которые не были спрогнозированы.

Вопросы обеспечения необходимых условий безопасности в процессе применения эффективных методов СП остаются недостаточно разработанными, так как имеют сложный комплексный характер, требуют глубоких межотраслевых исследований и функционального моделирования [5]. Современные требования к спортивным результатам, зрелищности соревнований, комфортности и эффективности тренировочного процесса, а также результат применения новейших достижений в области биологии, медицины, педагогики, техники, материаловедения и других наук требуют переосмысления классического подхода к обеспечению безопасности СП.

Данная проблема приобретает особую актуальность в связи с тем, что в современных условиях спорт, в отличие от физической культуры, преследующей цель развития физических возможностей и сохранение здоровья, имеет устойчивую тенденцию к профессиональной специализации в области индустрии развлечений. В этой области, к сожалению, преобладают коммерческие цели, а риски, связанные с достижением этих целей, включая безопасность, имеют вторичный характер.

Целью исследования являлся анализ элементов спортивной подготовки, систематизация мер безопасности и разработка комплексного подхода к ее оценке.

Методика

В ходе исследования проанализированы и систематизированы элементы процесса СП, влияющие на безопасность деятельности спортсмена. Основой

разработки системы критериев являлись статистические данные, результаты опыта практического применения методов СП и теоретического моделирования. При разработке критериев безопасности СП использованы материалы анкетирования 34 экспертов – специалистов и тренеров 5-го этапа СП (этап высшего спортивного мастерства). При оценках уровней опасности СП экспертами учитывался как риск нанесения ущерба здоровью (частота травматизма), так и тяжесть последствий такого ущерба.

Результаты и обсуждение

При проведении исследования исходили из того, что СП – это процесс, связанный с организацией, обеспечением и выполнением спортивных упражнений, который является организованным и управляемым социальным явлением, состоящим из многочисленных элементов, функции которых могут отличаться, но тем не менее скоординированы и взаимосвязаны.

Безопасность СП, как отдельное понятие, характеризующее весь процесс, допускает существование схожих терминов, определяющих безопасность отдельных элементов СП, например: безопасность спортивного оборудования, безопасность техники выполнения упражнений, психофизическая безопасность и т.д. Оценку безопасности отдельных элементов СП дают специалисты в соответствующей области, общую оценку безопасности СП могут дать специалисты, использующие методологию, позволяющую учитывать безопасность (опасность) всех элементов СП.

При классическом подходе к обеспечению безопасности СП результат и возможные риски позволяют прогнозировать профессиональные знания, общепринятые правила, жизненный опыт, статистику. Комплексный подход подразумевает структурирование исследуемого явления по разным направлениям с целью узкоспециализированного исследования отдельных элементов и их взаимодействия с остальными элементами для более точного моделирования общих процессов, которые позволят прогнозировать потенциальные риски до наступления нежелательных последствий.

Структура и взаимосвязи элементов процесса СП, оказывающих влияние на ее безопасность, представлена на рисунке. В данную структуру входят:

1) спортсмен с его особенностями состояния и процесса функционирования биологического организма определенного возраста, имеющий определенные физические качества и функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности (природная одаренность, талант);

2) техника выполнения спортивного упражнения – особенности, качество и навыки выполнения

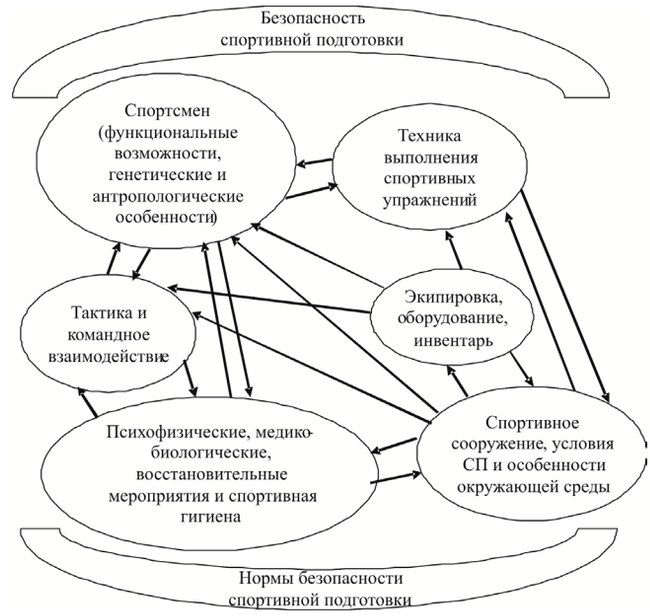

Рисунок. Структура элементов системы спортивной подготовки, оказывающих влияние на ее безопасность

спортивных упражнений в конкретном виде спорта, полученные и развитые в результате тренировок;

3) тактика и командное взаимодействие – использование спортсменом знаний и умений, полученных в результате тренировок и специальной подготовки, которые направлены на сбор и анализ информации о соперниках и других спортивных задачах и позволяют спортсмену принимать решения с целью оптимизации соревновательной деятельности и эффективного управления своими способностями;

4) экипировка, оборудование, инвентарь – технические характеристики спортивного оборудования и инвентаря, используемого в процессе выполнения спортивного упражнения, их качество и индивидуальная подгонка;

5) спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды – объект, имеющий конструкцию и оснащение необходимого качества, используемый для проведения тренировочного и соревновательного процессов при различных климатических и погодных условиях;

6) психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивная гигиена – организованная деятельность по предварительной подготовке физических способностей спортсмена к выполнению упражнения с целью мобилизации внутренних ресурсов к определенному периоду времени.

В целом безопасные условия СП принято рассматривать как объективное взаимодействие организма спортсмена со спортивным объектом и окружающей средой в процессе СП в условиях воздействия различных благоприятных и неблагоприятных

факторов СП на выполнение спортивного упражнения, с учетом использования инвентаря, решения тактических задач, поддержания процессов жизнеобеспечения и функционирования систем организма спортсмена [6, 7].

Представленная структура элементов СП (см. рис.) является базой для разработки норм безопасности и определения границ ответственности, которые необходимо учитывать при формулировании требований к процессу СП, при создании необходимых условий и в ходе применения правил СП, обеспечивающих безопасность жизни и здоровья людей, а также сохранение материально-технической базы спортивных сооружений и элементов городской инфраструктуры.

Комплексная безопасность СП имеет определенную отраслевую структуру и включает биологические, технические, организационно-методические и другие компоненты. Такая структура помогает создать качественную функциональную модель СП, эффективно используя знания специалистов в соответствующих научных областях. Большинство специалистов оценивают потенциальные риски, используя имеющиеся у них знания и опыт в конкретной области. К сожалению, преувеличение специалистами значения и важности своих профессиональных знаний – явление распространенное, особенно для узкоспециализированных профессий. Недооценка важности процессов СП, находящихся вне области компетенции специалистов и организаторов СП, нередко скрывает от них потенциальные риски. С другой стороны, скрытый характер возможных угроз безопасности и их очевидность только для специалистов часто становятся причиной чрезвычайных происшествий, имеющих трагические последствия.

Причиной большинства случаев травматизма является труднопрогнозируемое совпадение ряда критических процессов. Элементы СП часто тесно взаимосвязаны и оказывают друг на друга существенное влияние. Важность этого влияния и их последствие может квалифицированно оценить соответствующий специалист, иногда очень узкого профиля. Учитывая, что универсальных специалистов не бывает и для создания комплексной объективной картины безопасности требуется участие специалистов разных областей знаний, применение данной структуры СП призвано облегчить их взаимодействие по решению общих и смежных экспертных задач.

В настоящее время общий порядок принятия решений о допустимом уровне безопасности определяется руководящими работниками и специалистами спортивных организаций в соответствии с Федеральным законом ФЗ-329 «О физической культуре и спорте в Российской Федерации», ГОСТ Р 52025-2003 «Услуги физкультурно-оздоровительные и спортивные. Требования безопасности потребителей», паспортом безопасности объекта спорта и другими не являющимися обязательными нормативными актами. Статистика чрезвычайных происшествий, техническое развитие спортивной отрасли, значительное повышение уровня спортивных результатов требуют обновления нормативной базы существующего законодательства. Необходима разработка технического регламента безопасности СП. Законодательство РФ недостаточно четко определяет ответственность за безопасность СП, в том числе персональную, и в этой части также требуется детальная регламентация.

К сожалению, часто заключение о безопасности СП аргументируется проверенной безопасностью ее отдельных технических элементов, регулярным медицинским контролем, квалификацией тренера или опирается на факт наличия сертификата безопасности оборудования, инвентаря или других, несомненно, важных элементов СП, при этом безопасность (опасность) остальных элементов СП учитывается недостаточно.

Предлагаемая четкая структура элементов для комплексной оценки безопасности СП определяет границы исследования различных элементов СП, ориентирует ее организаторов в направлениях, требующих особого внимания, устанавливает взаимодействие специалистов в смежных областях, что в конечном счете позволит снизить частоту травматизма и несчастных случаев.

Спортивная подготовка нередко представляет серьезную опасность не только для спортсменов, но также и для зрителей, тренеров, спортивных сооружений и городской инфраструктуры. В связи с этим безопасность (опасность) в спорте должна основываться на критериях, характеризующих тяжесть нанесения прямого или косвенного ущерба человеку и обществу непосредственно в момент СП, а также в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. При градации степени безопасности СП в качестве критериев необходимо учитывать все 6 элементов системы (см. рис.):

1) функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена;

2) технику выполнения спортивных упражнений;

3) тактику и командное взаимодействие;

4) экипировку, оборудование, инвентарь;

5) спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды;

6) психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивную гигиену.

При этом целесообразно выделять 5 уровней безопасности (опасности) СП:

1) *безопасная* – риск нанесения прямого или косвенного ущерба здоровью человека не превышает

Таблица 1

Результаты оценки экспертами уровней опасности спортивной подготовки в некоторых видах спорта

№ п/п	Вид спорта	Элементы системы спортивной подготовки						Общий критерий опасности вида спорта
		Функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена	Техника выполнения спортивных упражнений	Тактика и командное взаимодействие	Экипировка, оборудование, инвентарь	Спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды	Психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивная гигиена	
1	Футбол	3	2	4	3	1	3	4
2	Бокс	5	4	4	1	1	3	5
3	Стрельба из лука	1	3	1	4	3	1	4
4	Парашютный спорт	1	4	2	4	4	2	4
5	Бильярд	1	3	1	1	1	2	3
6	Мотоспорт	1	3	5	4	5	3	5

рисков, возникающих в процессе бытовой двигательной активности;

2) *небольшая опасность* – при несоблюдении правил безопасности СП существует риск нанесения ущерба здоровью, связанного с необходимостью лечения и восстановления здоровья;

3) *опасная* – при соблюдении правил безопасности СП существует риск нанесения ущерба связанного с необходимостью лечения и восстановления здоровья;

4) *повышенная опасность* – при несоблюдении правил безопасности СП существует риск получения тяжелой травмы, гибели или инвалидности;

5) *экстремально опасная* – соблюдение правил безопасности СП не гарантирует сохранение жизни и здоровья.

С учетом выбранных критериев эксперты-специалисты оценили 6 видов спорта (футбол, бокс, стрельба из лука, парашютный спорт, бильярд, мотоспорт) по уровням опасности (табл. 1). Как видно из табл. 1, некоторые виды спорта имеют сходные экспертные оценки уровней опасности элементов СП, однако даже небольшое отличие (в правилах соревнований, инвентаре, условиях проведения соревнований) может кардинально повлиять на обеспечение безопасности. Например, даже обычное перемещение по территории спортивного объекта для человека, не прошедшего инструктаж, может представлять опасность как для него, так и для других участников СП.

При комплексной оценке общей безопасности СП по определенному виду спорта или дисциплине учитывается уровень опасности каждого элемента СП, при этом интегральный уровень опасности СП по каждому виду спорта или дисциплине определяется по максимальному уровню опасности среди всех элементов этого вида спорта. Так, в футболе наибольший риск нанесения ущерба представляют тактика и командное взаимодействие, характеризующееся 4-м уровнем (повышенная опасность СП) поэтому футбол относится к 4-й категории опасности СП. В боксе наибольший риск нанесения ущерба представляют функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена, оцененные как 5-й уровень (экстремально опасная СП), поэтому бокс относится к 5-й категории опасности СП. В стрельбе из лука наибольший риск нанесения ущерба представляет экипировка, оборудование, инвентарь (4-й уровень – повышенная опасность СП), поэтому стрельба из лука соответственно относится к 4-й категории опасности СП.

Основные направления по повышению уровня безопасности системы СП изложены в табл. 2.

Применения данного метода системного анализа особенно важно для руководителей спортивных объектов, на которых проводится СП по нескольким

Таблица 2

Общая характеристика элементов системы СП и направления по повышению уровня безопасности

Элемент спортивной подготовки (краткое описание)	Причины нанесения ущерба элементу безопасности	Направления по повышению уровня безопасности
1. Функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена (соответствие физического состояния спортсмена, физических и физиологических особенностей его организма специальным условиям и предельным нагрузкам при выполнении спортивных упражнений)	1) Интенсивные большие нагрузки, выполняемые спортсменом на фоне текущего заболевания (вирусная инфекция и др.); 2) чрезмерные нагрузки, превышающие адаптационные возможности спортсмена, часто в сочетании с другими неблагоприятными факторами: изменяющиеся хронобиологические и климатогеографические условия (низкая или высокая температура окружающей среды, влажность), эмоциональное перевозбуждение, двигательные асимметрии [6, 7]); 3) механические травмы (особенно опасны травмы головы, сердца, органов брюшной полости, переломы позвоночника, в том числе проникающие повреждения внутренних органов при фехтовании и стрельбе)	1) Контроль за текущим состоянием здоровья спортсмена и недопущение тренировок и выступлений при болезненных состояниях; 2) своевременная диагностика, первая медицинская помощь и правильная реабилитация; 3) оправданный режим тренировок и уровень нагрузок с учетом неблагоприятных факторов психоэмоциональных, наследственных и средовых факторов; 4) разработка и использование средств и меры по предупреждению механических травм
2. Техники выполнения спортивных упражнений в конкретном виде спорта (особенности методики и техники выполнения спортивных упражнений в конкретном виде спорта)	Риски нанесения существенного вреда здоровью спортсмена и окружающим его людям при использовании данной техники выполнения спортивных упражнений [3]	Обеспечиваются навыками, получаемыми спортсменами в результате тренировок по методикам, разрабатываемым специалистами-практиками, изучающими и совершенствующими технику выполнения упражнений спортивной направленности в определенном виде спорта
3. Тактика и командное взаимодействие (тактические приемы, последовательность действий, стратегия поведения, ложные движения и другие факторы, способные дезориентировать противника, вынуждающие его внести внезапные изменения в тактику и технику выполнения упражнения)	Создание неожиданных опасных ситуаций, не имеющих запрограммированного решения либо пиковых нагрузок, превышающих физические возможности спортсменов или их соперников	Безопасность тактических приемов и командного взаимодействия должна обеспечиваться знаниями и способностями, получаемыми спортсменами в результате специальной подготовки
4. Экипировка, оборудование, инвентарь (технические характеристики современного оборудования и инвентаря, используемого в процессе выполнения спортивного упражнения, которые направлены на повышение спортивного результата, обеспечение эффективной концентрации энергии при выполнении упражнения)	Технические характеристики, конструктивные особенности, не отвечающие современным условиям тренировок, соревнований и техническим требованиям. Недоработки и недостаточное качество оборудования и инвентаря, используемого в процессе выполнения спортивного упражнения, его качество и индивидуальная подгонка в условиях предельных спортивных нагрузок представляет непосредственную угрозу участникам СП, зрителям и лицам, оказавшимся на прилегающих территориях	Безопасность спортивного оборудования и инвентаря, используемого в процессе выполнения спортивного упражнения, обеспечивается правилами их использования, расчетом физико-механических свойств, качеством материалов, применяемых при их изготовлении, особенностями конструкции и исправностью. Перечисленные факторы предполагают разработку технических норм, стандартов и обязательное участие технических специалистов в обеспечении безопасности

Окончание таблицы 2

Элемент спортивной подготовки (краткое описание)	Причины нанесения ущерба элементу безопасности	Направления по повышению уровня безопасности
5. Спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды (необходимая конструкция сооружения для проведения спортивного соревнования или СП, режимы его эксплуатации, определенные правилами соревнований или программами СП, условия СП и особенности окружающей среды)	Несоответствие параметров конструкции и/или режимов эксплуатации спортивного сооружения (спортивного объекта), условий СП и особенностей окружающей среды требованиям безопасности для спортсменов и окружающих лиц	Обеспечивается привлечением специалистов при проектировании, строительстве и эксплуатации спортивных объектов, разработкой и применением стандартов к спортивному оборудованию, инвентарю, спортивным сооружениям [8]. Учет гигиенических нормативов к вредным факторам окружающей среды, в том числе при СП в специальных условиях (в бассейне с хлорированной водой, в горах при недостатке кислорода, при экстремально низкой или высокой температуре и др.)
6. Психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивная гигиена (предварительная подготовка физиологических способностей спортсмена с целью мобилизации внутренних ресурсов к определенному периоду времени и восстановительные мероприятия в тренировочно-соревновательном цикле, нормы спортивной гигиены)	Несоответствие психофизиологических способностей спортсмена реальным нагрузкам, агрессивной среде, с наличием соперников (особенно в единоборствах), преодоление сверхнагрузок, стремлением к рекордам, часто в экстремальных условиях окружающей среды, с необходимостью соблюдения строгого ограничительного режима	1. Ослабление организма экстремальными факторами требует комплекса защитных мероприятий, адекватных возможным угрозам жизни и здоровью; 2. Учет норм спортивной гигиены. 3. Организованная деятельность спортсмена должна проводиться под руководством и контролем специалистов, обладающих специальными знаниями и навыками в этих областях, при наличии соответствующего оборудования и организационно-технических возможностей

видам спорта в целях обеспечения комплексной безопасности СП. Общий уровень опасности СП на определенном объекте спорта определяется по максимальному уровню опасности, установленному из всех тех видов спорта, по которым осуществляется подготовка на этом объекте.

Для совершенствования мер безопасности, учитывая накопленный опыт в виде спорта, анализируя причины и последствия фактов травматизма, моделируя и оценивая риски спортивных упражнений для спортсмена и окружающих его людей, специалисты разрабатывают новые требования и, внося поправки в правила СП, совершенствуют технику выполнения упражнений. Использование особой техники выполнения упражнений позволяет повысить концентрацию энергии спортивного упражнения до уровня, устраняющего риск нанесения существенного вреда в краткосрочной или долгосрочной перспективе.

Однако часто причиной несчастных и трагических случаев становится ряд роковых совпадений, предотвратить которые можно, только используя методы комплексного подхода к обеспечению безопасности, опираясь на опыт и знания специалистов, исследуя и оценивая риски функционирования всех элементов СП в самых маловероятных, но возможных случаях. Рассмотрим примеры трагических случаев, причиной которых стали недостатки в организации комплексной безопасности, имеющие скрытый (неочевидный) характер и для моделирования возможных процессов требующие обязательного привлечения специалистов, обладающих специализированными знаниями в конкретных областях.

Как показывает экспертиза, нередка источником травм и причиной гибели людей в ходе СП является взаимодействие (контактный удар) тела человека с твердым предметом, важнейшим фактором при этом выступает относительная скорость и масса взаимодействующих тел. Роль средства защиты при этом сводится к уменьшению скорости соприкосновения, проще говоря, к торможению, а также увеличению площади соприкосновения. Для защиты различных частей тела широко используются панцирные приспособления: шлемы, маски, щитки, налокотники, наколенники, бюстгальтеры, раковины, камзолы (при изготовлении которых используются прочные и эластичные материалы кевлар, и др.). В связи с этим в ряде видов спорта обязательное наличие защитного снаряжения предусмотрено правилами соревнований. Защитная экипировка является эффективным средством повышения безопасности, но она требует правильного ношения, обязательного контроля защитных свойств и соответствия размеру. Иногда характер спортивного упражнения не дает возможности обеспечить безопасность спортсмена только с помощью экипировки, в этом случае помогают различного рода смягчающие покрытия и

заграждения: поролоновые маты, сетки, борта и т.п.

Несмотря на очевидный технический характер многих чрезвычайных происшествий, основной причиной большинства из них является человеческий фактор, поэтому не прошедшие инструктаж по безопасности, больные, технически не подготовленные, без необходимой экипировки спортсмены не должны допускаться к выполнению спортивных упражнений. Правила допуска спортсменов к СП должны содержать необходимые для этого нормы. Правила организации СП также должны определять лиц, персонально ответственных за безопасность.

Количество случаев причинения вреда, их тяжесть можно снизить путем комплексного подхода к разработке эффективных правил безопасности, контролем их обязательного соблюдения и использованию современных методов прогнозирования возможных рисков процессов СП, гигиенического нормирования и прогнозирования неблагоприятного действия факторов окружающей среды и психоэмоциональных факторов на организм спортсмена [9, 10].

Предлагаемый комплексный подход к оценке безопасности СП позволяет обоснованно разрабатывать нормы безопасности, условия и правила организации и проведения СП, направленные на сохранение жизни и здоровья людей, материально-технической базы спортивных сооружений, элементов городской инфраструктуры. Эти нормы, установленные федеральными законами, техническими регламентами и др., могут быть действительно эффективным фактором обеспечения безопасности, если они будут учитываться при разработке правил, федеральных стандартов, норм, технических требований, которыми руководствуются участники СП.

Качество разработки подобных нормативных документов, правил сертификации спортивных объектов и спортивно-технических изделий, оснащение и компетентность испытательных лабораторий оказывает существенное влияние на безопасность СП. А недооценка важности системы комплексного подхода к обеспечению безопасности приводит к зависимости методов обеспечения безопасности и действующих правил не от определяющих факторов, а лишь от статистики спортивного травматизма.

Безусловно, достичь полной безопасности СП невозможно, но, используя комплексный подход к обеспечению безопасности, можно существенно снизить риск причинения ущерба здоровью спортсменов, а также спортивным сооружениям и объектам.

Выводы

1. Выделены элементы системы СП, определяющие ее безопасность: 1) функциональные возможности, генетические и антропометрические особенности организма спортсмена; 2) техника выполнения спортивных упражнений; 3) тактика и командное взаимодействие; 4) экипировка, оборудование, инвентарь; 5) спортивное сооружение, условия СП и особенности окружающей среды; 6) психофизические, медико-биологические, восстановительные мероприятия и спортивная гигиена.

2. Определены уровни безопасности (опасности) СП: безопасная, небольшая опасность, опасная, повышенная опасность, экстремально опасная.

3. Показана возможность и целесообразность оценки экспертами безопасности СП по отдельным видам спорта, при этом интегральный уровень опасности СП по каждому виду спорта или дисциплине определяется по максимальному уровню опасности среди всех элементов этого вида спорта.

4. Общий уровень опасности СП на определенном объекте спорта определяется по максимальному критерию опасности из всех тех видов спорта, по которым осуществляется подготовка или соревнования на этом объекте.

5. Комплексный подход к обеспечению безопасности СП предполагает использование метода структурирования СП, что позволяет детально оценивать функционирование и механизмы взаимодействия отдельных элементов этой системы между собой и на этой основе разрабатывать нормы и правила обеспечения безопасных условий, организации и проведения СП.

Список литературы

1. *Королёв В.А., Клендар В.А.* Научно обоснованные подходы к применению средств и методов превентивного купирования морфофункциональных асимметрий у спортсменов в различных видах спорта. М., 2015.

Korolev V.A., Klendar V.A. Scientifically based approaches to the use of tools and methods for preventive relief of morphofunctional asymmetries in athletes in various sports. Moscow, 2015.

2. *Жалпанова Л.Ж.* Спорт, который вас убивает. М., 2007.

Zhalpanova L.Zh. The sport that kills you. Moscow, 2007.

3. *Власов А.А.* Чрезвычайные происшествия и несчастные случаи в спорте (причинно-следственные связи, классификация, ответственность): Учеб. пос. М., 2001.

Vlasov A.A. Emergency cases and accidents in sports. Moscow, 2001.

4. *Morrison B.N., McKinney J., Isserow S., Lithwick D. et al.* Assessment of cardiovascular risk and preparticipation screening protocols in masters athletes: the Masters Athlete Screening Study (MASS): a cross-sectional study // BMJ Open Sport & Exercise Medicine. 2018. V. 4. e000370. DOI:10.1136/bmjsem-2018-000370. Available at: https://bmjopensem.bmj.com/content/4/1/e000370 (accessed 23.10.2018).

5. *Королёв В.А., Калинкин Л.А., Юрьева И.В. и др.* Биотехнические системы в спорте // Вестник спортивной науки. 2014. № 6. С. 36–41.

Korolev V.A., Kalinkin L.A., Yuryeva I.V. et al. Biotechnical systems in sports // Vestnik sportivnoy nauki. 2014. № 6. P. 36–41.

6. *Абрамова Т.Ф., Акопян А.О., Клендар В.А. и др.* Особенности хронобиологической и климатогеографической адаптации высококвалифицированных спортсменов к условиям Рио-де-Жанейро с учетом особенностей видов спорта. М., 2017.

Abramova T.F., Akopyan A.O., Klendar V.A. et al. Features of chronobiological and climatogeographic adaptation of highly skilled athletes to the conditions of Rio de Janeiro, taking into account the characteristics of sports. Moscow, 2017.

7. *Абрамова Т.Ф., Яшина Е.Р., Шустин Б.Н. и др.* Практические рекомендации для спортсменов, тренеров и специалистов спортивных сборных команд России по реализации мер, направленных на оптимизацию адаптации представителей различных видов спорта к условиям Рио-де-Жанейро для планирования заключительного этапа подготовки к играм XXXI Олимпиады. М., 2016.

Abramova T.F., Yashina E.R., Shustin B.N. et al. Practical recommendations for athletes, coaches and specialists of sports teams of Russia to implement measures aimed at optimizing the adaptation of representatives of various sports to the conditions of Rio de Janeiro for planning the final stage of preparation for the games of the XXXI Olympiad. Moscow, 2016.

8. *Королёв В.А.* Сборник стандартов и табелей спортивного оборудования, инвентаря и других спортивно-технологических средств. Ч. I: Летние олимпийские виды спорта. М., 2010; Ч. II: Зимние олимпийские виды спорта. М., 2010.

Korolev V.A. Collection of standards and tables of sports equipment, equipment and other sports and technological tools. P. I: Summer Olympic sports. Moscow, 2010; P. II: Winter Olympic sports. Moscow, 2010.

9. *Мельниченко П.И., Прохоров Н.И., Ермакова Н.А., Юрьева И.В.* К 130-летию кафедры общей гигиены Первого московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93. № 4. С. 127–129.

Melnichenko P.I., Prokhorov N.I., Ermakova N.A., Yureva I.V. On the 130th anniversary of the Department of General Hygiene Sechenov Moscow State Medical University // Gigiena i sanitariya. 2014. V. 93. № 4. P. 127–129.

10. *Иванова Е.И., Иванов И.В., Сердакова К.Г.* Синдром эмоционального выгорания и стили педагогического общения у преподавателей в медицинском вузе // Вестник Российской академии медицинских наук. 2011. № 1. С. 39–42.

Ivanova E.I., Ivanov I.V., Serdakova K.G. Emotional burnout syndrome and pedagogical styles in teachers of a medical high school // Vestnik Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk. 2011. № 1. P. 39–42.

Поступила 23.10.2018

EXPERT REVIEW OF THE WAYS TO REDUCE THE INJURY RATE AMONG ATHLETES

Korolev V.A., Kalinkin L.A., Ivanov I.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 67–75

The growing challenge of sports safety culture necessitates pilot studies in allied disciplines and terms definition. Our analysis brought to light the following components vital for safety in the sport training system: 1) functional capability, genetic and anthropometrical portrait of athlete; 2) exercise technique; 3) tactics and team building; 4) outfit, equipment; 5) facility, conditions, environment; 6) psychophysical, biomedical, rehabilitation, and hygiene programs. Training safety (hazard) levels are: perfect, restricted, low, very low, extremely low. The integrated approach is based on the method of elementwise structuring of training aimed at in-depth studies of the functioning and interdependence of the system elements and development thereupon of safety standards and policy.

Key words: athlete health, sport training, sport training systems and elements, safety criteria, safety (hazard) levels, system approach.

УДК 611.08:615.21:599.3/.8

АНТИАМНЕСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ 3-ГИДРОКСИПИРИДИНА

Иванов Ю.В., Яснецов Вик.В., Карсанова С.К., Яснецов В.В.

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

E-mail: vvy@lsn.ru

В экспериментах на мышах установлено, что новые производные 3-гидроксипиридина СК-132 (50 мг/кг), СК-170 и СК-171 (12,5; 25 и 50 мг/кг) обладали антиамнестическими свойствами на 2 моделях амнезии, вызванной электросудорожным шоком и скополамином. При этом СК-170 и СК-171 оказывали выраженное действие, превосходя препарат сравнения мексидол, а СК-132 не уступал ему. Показано, что у кошек СК-132, СК-170 и СК-171 (при пневмомикроинъекции) оказывали прямое влияние на 77, 88 и 88 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры соответственно. При этом тормозная реакция встречалась в 11; 13,5 и 13 раз чаще, чем возбуждающая, а угнетающий эффект у СК-170 и СК-171 наблюдался в 1,4 раза чаще, чем у мексидола. Следовательно, поле 5 теменной ассоциативной коры играет важную роль в реализации центрального, в том числе и антиамнестического, действия этих новых соединений.

Ключевые слова: новые производные 3-гидроксипиридина, антиамнестическое действие, поле 5 теменной ассоциативной коры, мыши, кошки.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 76–80.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-76-80

Несмотря на многочисленные достижения современной медицины, болезнью движения (БД), или укачиванием, страдает огромное количество людей. Поэтому профилактика и лечение БД до сих пор остаются одной из важнейших проблем авиакосмической и морской медицины, а также для путешественников и др. [1–7].

Известна важная роль теменной ассоциативной коры в дефиците восприятия и памяти при пространственном взаимодействии, внимания и др., а также в патогенезе БД. Теменная ассоциативная кора – область глобального межанализаторного взаимодействия, играющая важную роль в обеспечении мультисенсорной интеграции, представляющая важнейший дискриминационно-интегративный аппарат больших полушарий [8–11].

В настоящее время в медицинской практике для коррекции мнестических расстройств различного генеза широко используют отечественное лекарственное средство этилметилгидроксипиридина сукцинат (лекарственные препараты мексидол, мексикор и др.), принадлежащее к классу производных 3-гидроксипиридина, имеющее мембранопротекторный и антиоксидантный механизм действия и обладающее уникальным спектром фармакологических свойств, в том числе антиамнестическими и вестибулопротекторными [12–16]. В эксперименте на животных установлено, что некоторые новые производные 3-гидроксипиридина – 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина L-аспарагинат, СК-119, ИБХФ-27 и др. – также оказывают антиамнестическое и вестибулопротекторное действие [17, 18]. Поэтому задачей данной работы явилось исследование антиамнестических свойств других 3 новых производных 3-гидроксипиридина – СК-132, СК-170 и СК-171 – на 2 моделях амнезии у мышей, а также их влияния на нейроны поля 5 теменной ассоциативной коры кошек.

Методика

Антиамнестические свойства веществ у 557 белых нелинейных мышей-самцов массой 20–24 г исследовали, используя условный рефлекс пассивного избегания (УРПИ) электрокожного раздражения [19]. В качестве амнезирующих воздействий использовали электросудорожный шок (ЭСШ; параметры электрического тока: 50 Гц, 50 мА, 0,3 с) и введение скополамина в дозе 1 мг/кг внутрибрюшинно (в/б). Новые производные 3-гидроксипиридина – СК-132, СК-170, СК-171, препарат сравнения мексидол (этилметилгидроксипиридина сукцинат) и 0,9%-ный раствор натрия хлорида (NaCl; контроль) вводили однократно в/б за 60 мин до обучения мышей. Более подробно методика описана ранее [12].

Эксперименты также проводили на 7 обездвиженных миорелаксантами кошках-самцах массой 3,1–3,8 кг, находящихся на искусственной вентиляции легких. Все хирургические манипуляции осуществляли в условиях общей анестезии барбитуратами (этаминал-натрий в/б, в дозе 35 мг/кг). Внеклеточную регистрацию биоэлектрической активности отдельных нейронов поля 5 (по Бродману) теменной ассоциативной коры и микроионофорез/пневмомикроинъекцию (3–10 psi; 1 psi ≈ 6 894,76 Па)

Таблица 1

Влияние новых производных 3-гидроксипиридина и препарата сравнения мексидола на амнезию у мышей, вызванную электросудорожным шоком и скополамином

Условия опытов и вещество (доза, мг/кг)	Общее число мышей	Число мышей, обучившихся УРПИ, %	Число мышей с амнезией УРПИ через 24 ч после амнезирующего воздействия, %
Электросудорожный шок (ЭСШ)			
0,9%-ный раствор NaCl + псевдоЭСШ (контроль 1)	36	33 (92)	6 (18)
0,9%-ный раствор NaCl + ЭСШ (контроль 2)	33	30 (91)	25 (83)°°°
СК-132 (12,5) + ЭСШ	14	13 (93)	7 (54)
СК-132 (25) + ЭСШ	18	17 (94)	8 (47)*
СК-132 (50) + ЭСШ	19	18 (95)	6 (32)***
СК-170 (12,5) + ЭСШ	19	18 (95)	5 (28)***#
СК-170 (25) + ЭСШ	20	19 (95)	4 (21)***#
СК-170 (50) + ЭСШ	20	19 (95)	3 (16)***
СК-171 (12,5) + ЭСШ	20	19 (95)	6 (32)***#
СК-171 (25) + ЭСШ	19	18 (95)	5 (28)***
СК-171 (50) + ЭСШ	19	18 (95)	3 (17)***
Мексидол (12,5) + ЭСШ	20	18 (90)	12 (67)°°°
Мексидол (25) + ЭСШ	20	19 (95)	10 (53)°
Мексидол (50) + ЭСШ	12	11 (92)	4 (36)**
Скополамин			
0,9%-ный раствор NaCl + 0,9%-ный раствор NaCl (контроль 1)	29	27 (93)	4 (15)
0,9%-ный раствор NaCl + скополамин (контроль 2)	27	25 (93)	19 (76)°°°
СК-132 (12,5) + скополамин	13	12 (92)	6 (50)
СК-132 (25) + скополамин	15	14 (93)	5 (36)*
СК-132 (50) + скополамин	16	15 (94)	4 (27)**
СК-170 (12,5) + скополамин	19	18 (95)	4 (22)***#
СК-170 (25) + скополамин	20	19 (95)	4 (21)***#
СК-170 (50) + скополамин	21	20 (95)	3 (15)***
СК-171 (12,5) + скополамин	20	19 (95)	5 (26)**#
СК-171 (25) + скополамин	19	18 (95)	4 (22)***#
СК-171 (50) + скополамин	20	19 (95)	3 (16)***
Мексидол (12,5) + скополамин	21	19 (90)	12 (63)°°°
Мексидол (25) + скополамин	15	14 (93)	8 (57)
Мексидол (50) + скополамин	13	12 (92)	4 (33)*

Примечание. Различия статистически значимы по сравнению с контролем 1 и контролем 2 соответственно: ° или * – $p < 0,05$; °° или ** – $p < 0,01$; °°° или *** – $p < 0,001$; # – $p < 0,05$ – значимость различий новых соединений и мексидола в аналогичных дозах (точный метод Фишера).

веществ осуществляли с помощью многоканальных стеклянных электродов. Более подробно методика описана ранее в работе [20].

В работе использовали новые производные 3-гидроксипиридина – СК-132, СК-170, СК-171, синтезированные и любезно предоставленные докт. хим. наук, профессором С.Я. Скачиловой (АО «ВНЦ БАВ», Россия), а также мексидол (ЗАО «Фармасофт», РФ).

Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием программы BioStat 2009 Professional.

Проведение экспериментов одобрено Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 427 от 27 июня 2016 г.).

Результаты и обсуждение

Электросудорожный шок через 24 ч вызывал у большинства мышей (83 %, $p < 0,001$) ретроградную амнезию УРПИ (табл. 1).

Новое производное 3-гидроксипиридина СК-132 в дозе 12,5 мг/кг существенно не влияло на амнезию УРПИ, а в дозах 25 и 50 мг/кг значимо ослабляло амнестический эффект в 1,8 ($p < 0,05$) и 2,6 раза ($p < 0,001$) соответственно. Другое новое производное 3-гидроксипиридина – СК-170 – в дозе 12,5 мг/кг значимо ($p < 0,001$) ослабляло данный эффект в 3,0 раза, в дозе 25 мг/кг практически полностью, а в дозе 50 мг/кг полностью предупреждало развитие амнезии. Третье новое соединение – СК-171 – в дозах 12,5 и 25 мг/кг значимо ($p < 0,001$) ослабляло выраженность амнезии в 2,6 и 3,0 раза соответственно, а в дозе 50 мг/кг полностью предупреждало ее развитие.

Препарат сравнения мексидол в дозах 12,5 и 25 мг/кг существенно не влиял на выраженность амнезии, а в дозе 50 мг/кг значимо ($p < 0,01$) ослаблял ее в 2,3 раза.

По выраженности действия СК-170 в дозах 12,5 и 25 мг/кг значимо ($p < 0,05$) превосходил мексидол в аналогичных дозах в 2,4 и 2,5 раза соответственно, а СК-171 в дозе 12,5 мг/кг – мексидол в данной дозе в 2,1 раза ($p < 0,05$).

Обнаружено, что через 24 ч после введения скополамина у большинства (76 %; $p < 0,001$)

Таблица 2

Влияние новых производных 3-гидроксипиридина и препарата сравнения мексидола (при пневмомикроинъекции) на спонтанную активность нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек

Вещество	Всего нейронов	Эффект	
СК-132	31 (100 %)	Возбуждающий	2 (6,4 %)
		Угнетающий	22 (71,0 %)
		Отсутствует	7 (22,6 %)
СК-170	33 (100 %)	Возбуждающий	2 (6,1 %)
		Угнетающий	27 (81,8 %)#
		Отсутствует	4 (12,1 %)
СК-171	32 (100 %)	Возбуждающий	2 (6,2 %)
		Угнетающий	26 (81,3 %)#
		Отсутствует	4 (12,5 %)
Мексидол	32 (100 %)	Возбуждающий	3 (9,4 %)
		Угнетающий	19 (59,4 %)
		Отсутствует	10 (31,2 %)

Примечание. Различия с аналогичными эффектами мексидола статистически значимы: # – $p < 0,05$ (точный метод Фишера).

животных наблюдалась ретроградная амнезия УРПИ (см. табл. 1).

СК-132 в дозе 12,5 мг/кг существенно не влиял на амнезию УРПИ, а в дозах 25 и 50 мг/кг значимо ослаблял амнестический эффект в 2,1 ($p < 0,05$) и 2,8 раза ($p < 0,01$) соответственно. СК-170 в дозах 12,5 и 25 мг/кг значимо ($p < 0,001$) ослаблял данный эффект в 3,4 и 3,6 раза соответственно, а в дозе 50 мг/кг полностью предупреждал развитие амнезии. СК-171 в дозах 12,5 и 25 мг/кг значимо ($p < 0,001$) ослаблял выраженность амнезии в 2,9 и 3,5 раза соответственно, а в дозе 50 мг/кг полностью предупреждал ее развитие.

Мексидол в дозах 12,5 и 25 мг/кг существенно не влиял на выраженность амнезии, а в дозе 50 мг/кг значимо ($p < 0,05$) ослаблял данный эффект в 2,3 раза.

По выраженности действия СК-170 в дозах 12,5 и 25 мг/кг значимо ($p < 0,05$) превосходил мексидол в аналогичных дозах в 2,9 и 2,7 раза соответственно, а СК-171 (12,5 и 25 мг/кг) – мексидол в 2,4 и 2,6 раза ($p < 0,05$) соответственно.

Итак, новые производные 3-гидроксипиридина СК-132, СК-170, СК-171 обладают антиамнестическими свойствами на 2 моделях амнезии у мышей, вызванной ЭСШ и скополамином. При этом СК-170 и СК-171 оказывают выраженное действие, превосходя мексидол, а СК-132 не уступает ему.

Было установлено, что СК-132, СК-170, СК-171 (при пневмомикроинъекции) оказывали сходное действие на спонтанную активность нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек (табл. 2).

Действительно, СК-132, СК-170, СК-171 главным образом угнетали фоновую импульсацию нейронов (у 71, 82 и 81 % клеток соответственно), а усиление спонтанной активности встречалось очень редко (у 6 % клеток). При этом тормозная реакция на пневмомикроинъекцию СК-132, СК-170 и СК-171 встречалась соответственно в 11, 13,5 и 13 раз чаще ($p < 0,001$), чем возбуждающая.

Препарат сравнения мексидол также в основном угнетал фоновую импульсацию нейронов (у 59 % клеток), а усиление спонтанной активности встречалось редко (у 9 % клеток). Следовательно, мексидол оказывал прямое влияние на 69 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек. Тормозная реакция на пневмомикроинъекцию мексидола встречалась в 6,3 раза чаще ($p < 0,001$), чем возбуждающая.

При сравнении с действием мексидола на нейроны поля 5 теменной ассоциативной коры кошек отмечено, что угнетающий эффект у СК-170 и СК-171 наблюдается в 1,4 раза ($p < 0,05$) чаще, чем у него (82, 81 и 59 % клеток соответственно). Следовательно, СК-170 и СК-171 действуют более выражено, чем мексидол. У СК-132 данные различия с мексидолом не были статистически достоверными ($p > 0,05$).

Итак, новые соединения СК-132, СК-170 и СК-171 оказывают прямое влияние на 77, 88 и 88 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек соответственно, при этом угнетающий эффект у СК-170 и СК-171 наблюдается в 1,4 раза чаще, чем у мексидола.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными литературы. Так, например, ранее было установлено, что другие новые производные 3-гидроксипиридина – ИБХФ-27 и СК-119 – проявляют антиамнестические свойства на различных моделях амнезии у мышей: вызванной скополамином, ЭСШ, острой нормобарической гипоксической гипоксией с гиперкапнией и комплексным экстремальным воздействием [18]. В сходных экспериментальных условиях у кошек показано, что ИБХФ-27 и СК-119 способны оказывать прямое влияние на 84 и 42 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры соответственно; при этом тормозная реакция встречалась соответственно в 26 и 5,5 раза чаще, чем возбуждающая. Угнетающий эффект у ИБХФ-27 наблюдался в 2,3 и 1,4 раза чаще, чем у СК-119 и

мексидола соответственно, а у СК-119 – в 1,7 раза реже, чем у мексидола [18].

Таким образом, можно заключить, что новые производные 3-гидроксипиридина СК-132, СК-170, СК-171 обладают антиамнестическими свойствами на 2 моделях амнезии у мышей, вызванной ЭСШ и скополамином. При этом СК-170 и СК-171 оказывают выраженное действие, превосходя мексидол, а СК-132 не уступает ему. Кроме того, поле 5 теменной ассоциативной коры играет важную роль в реализации центрального, в том числе и антиамнестического, действия этих новых соединений. При этом у кошек СК-170 и СК-171 действуют более выражено, чем мексидол, в отношении нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры.

Выводы

1. Новые производные 3-гидроксипиридина – СК-132 (50 мг/кг), СК-170 и СК-171 (12,5, 25 и 50 мг/кг) обладают антиамнестическими свойствами на 2 моделях амнезии у мышей, вызванной электросудорожным шоком и скополамином. При этом СК-170 и СК-171 оказывают выраженное действие, превосходя препарат сравнения мексидол, а СК-132 не уступает ему.
2. У кошек СК-132, СК-170 и СК-171 (при пневмомикроинъекции) оказывают прямое влияние на 77, 88 и 88 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры соответственно, при этом тормозная реакция встречается соответственно в 11; 13,5 и 13 раз чаще, чем возбуждающая, а угнетающий эффект у СК-170 и СК-171 наблюдается в 1,4 раза чаще, чем у мексидола.

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН № 65.2.

Список литературы

1. *Григорьев А.И.* Вклад космической медицины в здравоохранение // Природа. 2012. № 1. С. 30–36.

Grigoriev A.I. Contribution of cosmic medicine to healthcare // Priroda. 2012. № 1. P. 30–36.

2. *Fydanaki O., Kousoulis P., Dardiotis E. et al.* Electroacupuncture could reduce motion sickness susceptibility in healthy male adults: a double-blinded study // Med. Acupunct. 2017. V. 29. № 6. P. 377–382.

3. *Powell-Dunford N., Bushby A.* Management of sea sickness in susceptible flight crews // Mil. Med. 2017. V. 182. № 11. P. e1846-e1850.

4. *Golding J.F., Wesnes K.A., Leaker B.R.* The effects of the selective muscarinic M3 receptor antagonist darifenacin, and of hyoscine (scopolamine), on motion sickness, skin conductance & cognitive function // Br. J. Clin. Pharmacol. 2018. V. 84. № 7. P. 1535–1543.

5. *Inprasit C., Lin Y.W., Huang C.P. et al.* Targeting TRPV1 to relieve motion sickness symptoms in mice by electroacupuncture and gene deletion // Sci. Rep. 2018. V. 8. № 1. P. 10365.

6. *Previc F.H.* Intravestibular balance and motion sickness // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2018. V. 89. № 2. P. 130–140.

7. *Reschke M.F., Wood S.J., Clément G.R.* A case study of severe space motion sickness // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2018. V. 89. № 8. P. 749–753.

8. *Правдивцев В.А., Козлов С.Б.* Архитектура поведенческого акта с позиции теории функциональной системы П.К. Анохина // Математическая морфология. 1997. Т. 2. № 2. С. 42–63.

Pravdivtsev V.A., Kozlov S.B. The architecture of the behavioral act from the perspective of the theory of the functional system of P.K. Anokhin // Matematicheskaya morfologiya. 1997. V. 2. № 2. P. 42–63.

9. *Козлов С.Б.* Нейрофизиологический анализ центральных механизмов вестибулярных реакций (системный подход): Автореф. дис. … д-ра мед. наук. М., 1998.

Kozlov S.B. Neurophysiological analysis of central mechanisms of vestibular reactions (system approach): Avtoreferat dissertatsii … doktora meditsinskikh nauk. Moscow, 1998.

10. *Коренюк И.И., Колотилова О.И.* Морфофункциональная организация интегративной деятельности теменной ассоциативной коры (поля 5 и 7) // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. 2008. Т. 21. № 2. С. 55–91.

Korenuk I.I., Kolotilova O.I. Morphofunctional organization of the integrative activity of the parietal associative cortex (fields 5 and 7) // Uchenie zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta imeni V.I.Vernadskogo. 2008. V. 21. № 2. P. 55–91.

11. *Bicanski A., Burgess N.* A neural-level model of spatial memory and imagery // Elife. 2018. № 7. P. e33752.

12. *Воронина Т.А., Яснецов В.В., Смирнов Л.Д. и др.* Особенности действия мексидола в экстремальных ситуациях (эксперименты на животных) // Авиакосм. и экол. мед. 2007. Т. 41. № 1. С. 42–47.

Voronina T.A., Yasnetsov V.V., Smirnov L.D. et al. Mexidol effects in extreme conditions (experiments with animals) // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2007. V. 41. № 1. P. 42–47.

13. *Воронина Т.А.* Мексидол: спектр фармакологических эффектов // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. 2012. № 12. С. 86–90.

Voronina T.A. Mexidol: the spectrum of pharmacological effects // Zhurnal nevrologii i psikhiatrii imeni S.S. Korsakova. 2012. № 12. P. 86–90.

14. *Воронина Т.А.* Пионер антиоксидантной нейропротекции. 20 лет в клинической практике // Русский медицинский журнал. 2016. Т. 24. № 7. С. 434–438.

Voronina T.A. Pioneer of antioxidant neuroprotection. 20 years in clinical practice // Russkiy meditsinskiy zhurnal. 2016. V. 24. № 7. P. 434–438.

15. *Бережная С.В., Якупов Э.З., Захаров Ю.А.* Эффективность комбинированной терапии мексидолом и церебролизином хронической ишемии головного мозга // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2016. Т. 116. № 5. С. 23–27.

Berezhnaya S.V., Yakupov E.Z., Zaharov Yu.A. The efficacy of combination therapy with mexidol and cerebrolysin in chronic cerebral ischemia // Zhurnal nevrologii i psikhiatrii imeni S.S. Korsakova. 2016. V. 116. № 5. P. 23–27.

16. *Путилина М.В.* Комбинированное применение нейропротекторов в терапии цереброваскулярных заболеваний // Там же. № 11. С. 58–63.

Putilina M.V. Combined therapy of cerebrovascular disorders with neuroprotectors // Ibid. № 11. P. 58–63.

17. *Яснецов В.В., Правдивцев В.А., Шашков А.В. и др.* Исследование противоукачивающих свойств производных 3-гидроксипиридина // Авиакосм. и экол. мед. 2005. Т. 39. № 4. С. 45–50.

Yasnetsov V.V., Pravdivtsev V.A., Shashkov A.V. et al. Investigation of the anti-motion sickness effect of 3-hydroxypyridine derivatives // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2005. V. 39. № 4. P. 45–50.

18. *Яснецов В.В., Яснецов Вик.В.* Фармакологическая профилактика и терапия болезни движения у человека и животных // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 3. С. 5–12.

Yasnetsov V.V., Yasnetsov Vik.V. Pharmacological prevention and therapy of motion sickness in humans and animals // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 3. P. 5–12.

19. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. Ч. 1. М., 2012.

Guide for conducting preclinical studies of drugs. P. 1. Moscow, 2012.

20. *Мотин В.Г., Яснецов Вик.В., Забозлаев А.А. и др.* Электрофизиологическое исследование механизма действия мексидола // Эксперим. и клин. фармакология. 2012. Т. 75. № 1. С. 3–7.

Motin V.G., Yasnetsov Vic.V., Zabozlaev A.A. et al. Electrophysiological study of the mechanism of mexidol effect // Eksperimentalnaya i klinicheskaya farmakologiya. 2012. V. 75. № 1. P. 3–7.

Поступила 21.09.2018

ANTIAMNESTIC PROPERTIES OF NEW 3-HYDROXYPYRITES DERIVATIVES

Ivanov Yu.V., Yasnetsov Vik.V., Karsanova S.K., Yasnetsov V.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 76–80

Experiments with mice demonstrated the antiamnestic effects of new 3-hydroxypyrites derivatives SK-132 (50 mg/kg), SK-170 and SK-171 (12,5; 25 and 50 mg/kg) in 2 amnesia models, i.e. induced electroconvulsive shock and scopolamine. SK-170 and SK-171 excelled reference medicine mexidol, whereas the effect of SK-132 was equal of the mexidol one. Pneumomicroinjection of SK-132, SK-170 and SK-171 to cats had a direct effect on 77, 88 and 88 % neurons of field-5 of the parietal association cortex respectively. The inhibitory reaction was observed 11, 13,5 and 13 times more frequently than excitory. The inhibitory effect of SK-170 and SK-171 was observed 1,4 times more often than of mexidol. Consequently, field-5 of the parietal association cortex is a key for realization of the central, including antiamnestic effect of these new derivatives.

Key words: new 3-hydroxypyrites derivatives, antiamnestic effect, field-5 of the parietal association cortex, mice, cats.

УДК 579.65

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБНОЙ ОБСЕМЕНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНТЕРЬЕРА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ «Э-НОС»

Харин С.А.[1], Новикова Н.Д.[1], Смирнов Ю.И.[1], Поддубко С.В.[1], Феттер В.[2], Хуммель Т.[2], Рейдт У.[2], Хельвиг А.[2], Ленич Й.[3], Гроссер Я.[3]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Аэрбас ДС, Имменштаад, Германия
[3]Германский центр авиации и космонавтики, Бонн, Германия

E-mail: charin@imbp.ru

В работе представлены результаты второй части космического эксперимента «Электронный нос», в рамках которого был испытан новый подход к оценке микробной контаминации поверхностей интерьера Международной космической станции (МКС). Метод основан на использовании в микробиологическом мониторинге нового образца научной аналитической аппаратуры – прибора «Э-НОС», принципом действия которого является анализ состава газовых выделений бактерий и грибов, что позволяет быстро определять их содержание на поверхностях конструкционных материалов. Вторая часть эксперимента была рассчитана на полтора года, в течение которых каждые 2 мес космонавт с помощью прибора «Э-НОС» оценивал микробную загрязненность легко и труднодоступных поверхностей интерьера МКС и после каждого сеанса передавал данные для дальнейшей обработки на Землю. Всего было проведено 8 измерительных сессий, при выполнении которых удалось обнаружить как грибную, так и бактериальную загрязненность некоторых поверхностей станции.

Ключевые слова: Международная космическая станция, бактерии, грибы, микробная обсемененность, поверхности интерьера и оборудования, прибор «Э-НОС».

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 81–88.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-81-88

Важнейшим условием эксплуатации орбитальных космических станций является их экологическая безопасность, включающая обеспечение надежного контроля за физическими, химическими и биологическими параметрами среды обитания, в том числе за микробиологическим фактором [1]. Большой объем исследований особенностей формирования микробного сообщества и его свойств в условиях космического полета (КП) был выполнен в процессе многолетней эксплуатации орбитального комплекса «Мир» и в настоящее время проводится на Международной космической станции (МКС). С учетом имеющихся данных можно констатировать, что жизнедеятельность микроорганизмов в среде орбитальных станций сопровождается возникновением как медицинских, так и весьма серьезных технических рисков, в основе которых лежит резидентное заселение декоративно-отделочных и конструкционных материалов интерьера и оборудования бактериально-грибными ассоциациями [1–4]. В условиях эксплуатации на орбитальных комплексах материалы, изделия и приборы легко подвергаются микробному заражению, попадая на материалы, отдельные виды бактерий и плесневых грибов быстро приспосабливаются к росту на них, провоцируя повреждения в дальнейшем. Это происходит за счет проникновения в их структуры грибного мицелия, вовлечения компонентов материала в метаболизм микроорганизмов, в результате воздействия на материалы экзоферментов и органических кислот, продуцируемых грибами и бактериями. Все это приводит к изменениям в характеристиках материала, ухудшаются механическая прочность, диэлектрические и ряд других свойств [5–7].

Наиболее распространенными в среде космических станций деструкторами материалов являются бактерии родов *Bacillus*, плесневые грибы родов *Penicillium*, *Aspergillus*. Во внутреннем объеме орбитальной станции «Мир» за время ее эксплуатации было обнаружено более 234 видов бактерий и микроскопических грибов, многие из которых характеризовались повышенной способностью к деструкции материалов [8]. Периоды их активного развития сопровождались повреждением различных конструкционных материалов, в том числе синтетических полимеров, а также коррозией металлов, что в ряде случаев приводило к нарушениям в работе аппаратуры [5, 6].

В связи с этим необходимым условием автономной жизнедеятельности человека при длительном пребывании в пилотируемых космических комплексах (ПКК) с искусственной средой обитания является обеспечение санитарно-микробиологической

безопасности, что предусматривает постоянный и надежный оперативный контроль за микробиологическими параметрами среды. В настоящее время для оценки микробиологического состояния среды обитания человека, в частности поверхностей интерьера и оборудования, в процессе орбитальных КП в России и в других странах разработаны соответствующие методы контроля и анализа. В отличие от микробиологических исследований воздуха, исследование санитарно-микробиологического состояния поверхностей интерьера и оборудования российского сегмента (РС) МКС проводится только в лабораторных условиях на Земле. Для отбора проб с конструкционных и декоративно-отделочных материалов и их доставки на Землю космонавтами используются специальные тампоны, увлажненные консервантом, что позволяет сохранять отобранные с поверхностей микроорганизмы без изменения их количественного и качественного состава с момента отбора проб до их доставки в лабораторию [1]. Преимущество такого подхода состоит в том, что он позволяет проводить углубленные микробиологические исследования, однако следует отметить, что эти пробы могут доставляться на Землю только транспортными кораблями «Союз», что происходит достаточно редко и не дает возможности проводить экспресс-анализ в случае необходимости.

В то же время в условиях длительного КП, включая будущие межпланетные экспедиции, важным является постоянный оперативный микробиологический контроль поверхностей и оборудования. Учитывая периодически возникающую необходимость микробиологических исследований поверхностей интерьера и оборудования в процессе полета (например, при обнаружении на панелях различных пятен, изменений окраски, визуально напоминающих рост плесневых грибов, или необходимость оценки качества дезинфекции, проводимой по рекомендациям с Земли), важным представляется создание оборудования, позволяющего без затруднений проводить такие исследования и оценку их результатов членами экипажа непосредственно на борту. Для решения таких задач был разработан новый образец научной аппаратуры – портативная газовая сенсорная система «Э-НОС», которая позволяет определять количественный уровень бактерий, плесневых грибов и дрожжей на поверхностях конструкционных материалов, не отправляя пробы на Землю [9]. Также с использованием этого прибора с целью отработки нового экспресс-метода исследования микробной контаминации поверхностей материалов в условиях длительного КП был проведен космический эксперимент (КЭ) «Электронный нос».

Первая часть КЭ была выполнена в период экспедиции МКС-34/35. Для ее проведения на борт МКС был доставлен комплект научной аппаратуры «Э-НОС» и в результате обработки полученного экспериментального материала частично отработана экспресс-методика исследования микробной контаминации поверхностей в условиях длительного КП. Было показано, что научная аппаратура «Э-НОС» позволяет проводить измерение микробной обсемененности на борту станции и получать достоверные результаты, с ее помощью на образцах материалов, экспонированных более 2 мес внутри МКС, были обнаружены бактерии и дрожжи *Rhodotorula mucilaginosa* [9].

Для полноценного экспресс-мониторинга микробной загрязненности внутренних поверхностей МКС, позволяющего оперативно передавать данные измерения на Землю и оценивать уровни микробной обсемененности в различных зонах станции, была произведена незначительная модификация прибора «Э-НОС» и установлено необходимое программное обеспечение на бортовой компьютер. Вторая часть КЭ продолжалась более года (4 экспедиции). В течение этого времени космонавты с помощью прибора «Э-НОС» оценивали микробную обсемененность поверхностей интерьера РС МКС и после каждого сеанса эксперимента передавали данные на Землю для дальнейшей обработки и получения конечного результата.

Методика

Измерение микробной обсемененности поверхностей интерьера МКС научной аппаратурой «Э-НОС»

Принцип работы прибора «Э-НОС» основан на анализе количественного состава газовых выделений бактерий и грибов. Проявляя метаболическую активность при развитии на поверхности какого-либо материала, микроорганизмы выделяют во внешнюю среду летучие низкомолекулярные органические вещества, например, различные терпены, углеводороды, спирты, эфиры, органические кислоты, серосодержащие органические вещества и т.д., состав которых (запах микроорганизма) специфичен для большинства таксономических групп бактерий и грибов [10, 11]. Микроколичества этих соединений могут быть определены прибором «Э-НОС». Ключевым элементом прибора «Э-НОС» является сборка из 10 датчиков, расположенная в камере, объем которой составляет 1,8 см^3. Датчики являются полупроводниками на основе оксидов металлов, их чувствительность составляет 1 ppm. Избирательность сенсоров определяется вступающим в реакцию материалом, примесями и рабочей температурой датчика. Полупроводниковый слой состоит из оксидов металлов, таких, как оксид олова, вольфрама или цинка с примесями некоторых химических элементов, использующихся в качестве катализатора (например, платина или палладий). Принцип действия основан на изменении

Таблица 1

Виды бактерий и грибов, запахи которых входят в базу данных прибора «Э-НОС»

№ п/п	Вид микроорганизма	Б: Бактерии Г: Грибы	S1: Непатогенный S2: Условно-патогенный
1	*Bacillus cereus*	Б	S2
2	*B. licheniformis*	Б	S1
3	*B. pumilus*	Б	S1
4	*B. subtilis*	Б	S1
5	*Lysinibacillus sphaericus*	Б	S1
6	*Corynebacterium xerosis*	Б	S2
7	*Escherichia coli*	Б	S2
8	*Micrococcus luteus*	Б	S1
9	*Salmonella subterranea*	Б	S1
10	*Pseudomonas putida*	Б	S2
11	*P. stutzeri*	Б	S1
12	*Staphylococcus aureus*	Б	S2
13	*S. auricularis*	Б	S1
14	*S. epidermidis*	Б	S2
15	*S. warneri*	Б	S1
16	*Enterobacter cloacae*	Б	S2
17	*Aspergillus flavus*	Г	S2
18	*A. niger*	Г	S2
19	*A. sydowi*	Г	S2
20	*A. versicolor*	Г	S2
21	*Cladosporium cladosporioides*	Г	S2
22	*Penicillium chrysogenum*	Г	S2
23	*P. expansum*	Г	S2
24	*Ulocladium botrytis*	Г	S2
25	*Rhodotorula mucilaginosa*	Г	S1

сопротивления чувствительного слоя датчика при контакте с окисляющими или восстанавливающими химическими соединениями. При этом восстанавливающие соединения снижают, а окисляющие – повышают сопротивление датчика. Преимущество используемых датчиков состоит в том, что они относительно невосприимчивы к внешним воздействующим факторам, малозатратны и очень чувствительны. Один цикл измерения прибором «Э-НОС» занимает 10 мин и включает в себя 5 мин очистки сборки датчиков и 5 мин измерения.

Запахи, обнаруженные при измерении микробной обсемененности, статистически сравниваются со специально разработанной для прибора «Э-НОС» базой данных микробных запахов, после чего делается вывод о степени загрязненности поверхностей микроорганизмами. База данных микробных запахов создавалась в лабораторных условиях с использованием микроорганизмов, доминирующих в среде обитания МКС. Прибор в процессе обучения запоминал профиль летучих низкомолекулярных органических веществ, выделяемых микроорганизмом на различных фазах роста культуры. Использование статистического анализа для полученного массива сигналов сенсоров позволило определить кластеры данных, характерные для бактериальных и грибных запахов. Внутри кластеров можно было выделить области малого (10^3–10^4 колониеобразующих единиц), среднего (10^5–10^6 КОЕ), большого ($\geq 10^6$ КОЕ) содержания микроорганизмов, что соответствовало уровням микробной обсемененности, граничащих и превышающих нормативные показатели SSP 50260 MORD [12] по микробной контаминации внутренних поверхностей МКС.

Таким образом, в настоящее время научная аппаратура «Э-НОС» способна определять микробную обсемененность поверхностей, дифференцировать таксономическую принадлежность микроорганизмов (грибы или бактерии), развивающихся на этих поверхностях, а так же идентифицировать 25 наиболее распространенных микробных видов на МКС (табл. 1), включая таких мощных биологических деструкторов материалов, как *Bacillus subtilis*, *Penicillium expansum* и *Aspergillus versicolor* [9].

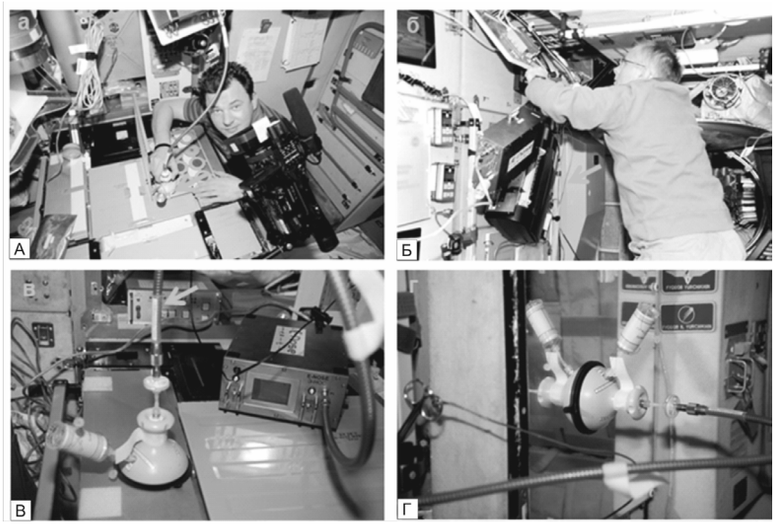

Рисунок. Измерение прибором «Э-НОС» микробной контаминации с использованием воздухозаборников для образцов материалов (А); для труднодоступных поверхностей (Б); для открытых поверхностей (В, Г)

Перед проведением второй части КЭ был определен перечень исследуемых в эксперименте поверхностей интерьера РС МКС. Выбор осуществляли на основе данных микробной обсемененности поверхностей станции, полученных при выполнении стандартной процедуры микробиологического мониторинга среды в рамках медицинского контроля РС МКС.

Наибольшим микробным загрязнением перед началом КЭ характеризовались:

– в СМ (служебный модуль) зеркало в каюте, потолок в туалетном отсеке, крышка КБО (контейнер бытовых отходов), потолок отсека АСУ (ассенизаторно-санитарная установка), рабочий стол, полотно бегущей дорожки, корпус за панелью 125, корпус за панелью 306, корпус за панелью 334;

– в МИМ-2 (малый исследовательский модуль) панель 101, панель 302;

– в МИМ-1 панель 110, панель 204, панель 402.

Для оценки обсемененности этих поверхностей бактериями и грибами находящийся на станции прибор дооснастили воздухозаборниками, позволяющими проводить измерения на легко и труднодоступных поверхностях. Если в первой части КЭ в основном исследовался микробный рост на образцах материалов, расположенных на планшете (рисунок, А), то во второй – на поверхностях интерьера станции, что потребовало специальной разработки и доставки на РС МКС дополнительных комплектующих к прибору (см. рис., Б–Г).

Все космонавты, выполнявшие эксперимент, проходили обучение работе с прибором «Э-НОС» на базе Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина и проводили КЭ согласно детально разработанным методике и процедуре эксперимента. При выполнении второй части КЭ космонавты в течение 4 экспедиций каждые 2 мес измеряли прибором микробную обсемененность поверхностей интерьера РС МКС. Запись данных осуществлялась на карту памяти, затем через интерфейс USB их переносили на бортовой компьютер для последующей передачи по каналам связи на Землю. В дальнейшем исходные данные обрабатывались в статистической программе WinMuster (Airsense Analytics, GmbH), где с использованием метода главных компонент проводилось сопоставление с базой данных микробных запахов прибора «Э-НОС» и выдавался конечный результат о степени микробной контаминации.

Определение микробной обсемененности поверхностей интерьера МКС стандартными лабораторными методами

В рамках контроля санитарно-эпидемиологического состояния РС МКС с ряда поверхностей, исследованных прибором во второй части КЭ «Электронный нос», были отобраны микробиологические пробы с помощью специального изделия, представляющего собой укладку фторопластовых пробирок с тампонами, пропитанными консервантом.

Данными тампонами космонавты отбирали пробы с поверхностей размером 10 х 10 см, эта процедура проводилась в последние 2–3 дня работы экспедиций, так как эффективность действия консерванта, сохраняющего на одном уровне количественный и качественный состав микроорганизмов в тампонах, не превышает 10 дней. Доставка укладок с уже отобранными пробами на Землю для проведения лабораторных исследований осуществлялась на кораблях «Союз» при возвращении сменяемого экипажа МКС [1].

Численность микроорганизмов в пробе оценивали в лабораторных условиях методом посева на питательные среды, разлитые в чашки Петри, – триптон-соевый агар (HiMedia, Индия) для подсчета бактерий, агар Чапека Докса (HiMedia, Индия) для грибов. После инкубирования посевов при 37 °С в течение 48 ч для бактерий и 28 °С в течение 5–7 сут для грибов учитывали выросшие на чашках колонии и рассчитывали микробную обсемененность поверхностей.

Результаты и обсуждение

Всего за время второй части эксперимента «Электронный нос» были проведены 30 измерений микробной обсемененности поверхностей интерьера МКС. В КЭ принимало участие 4 космонавта, обеспечивавших в течение 15 мес правильное

выполнение эксперимента согласно его методике и циклограмме. Работа с прибором «Э-НОС» по составленным бортовым инструкциям не вызвала у космонавтов серьезных затруднений, и после каждого завершенного сеанса КЭ ими были переданы в ЦУП-М (Центр управления полетами, Москва) файлы с исходными данными.

После получения исходных данных от ЦУП-М нами был проведен их анализ, в ходе которого сигналы датчиков прибора, полученные при измерениях на МКС, сравнивались с помощью программного обеспечения Winmuster методом главных компонент с базой данных микробных запахов «Э-НОС». Статистическая обработка исходных данных показала, что 8 из 30 подлежащих анализу измерений оказались в кластере бактериальных запахов, 7 – в кластере грибных, а оставшиеся были ближе к области отсутствия микробных запахов. Все измерения оказались вне видовых кластеров, что свидетельствовало о развитии на обсемененных поверхностях других бактериальных и грибных видов, запахи которых к моменту исследования не входили в базу данных Э-НОС. Следует отметить, что при реализации мероприятий, направленных на обеспечение санитарно-микробиологической безопасности МКС, существенным является обнаружение микробной контаминации в целом без дальнейшей видовой идентификации микроорганизмов, а в случае превышения нормативов SSP 50260 MORD по обсемененности поверхностей бактериями и грибами ЦУП-М отправляет радиограмму о проведении дезинфекционной обработки [12]. Все 15 измерений прибором, указывающие на микробную загрязненность поверхностей, находились в частях кластеров, характерных для низкого по количественному уровню микроорганизмов 10^3–10^4 КОЕ/100 см^2, что не превышает установленные SSP 50260 MORD нормативы для бактериальной обсемененности поверхностей (не более 10^4 КОЕ/100 см^2).

Таким образом, используя прибор «Э-НОС», удалось обнаружить бактериальную контаминацию на следующих поверхностях: потолок АСУ в СМ (2 раза в течение экспериментальных сессий № 3 и 6); панель № 101 в МИМ-2 (2 раза, сессии № 3, 6); панель № 110 в МИМ-2 (1 раз, сессия № 6); зеркало в каюте в СМ (1 раз, сессия № 7); корпус за панелью 125 в СМ (1 раз, сессия № 5) и рабочий стол в СМ (1 раз, сессия № 8). Также была обнаружена контаминация плесневыми грибами поверхностей: потолок АСУ в СМ (3 раза, сессии № 1, 2, 7), крышка КБО в СМ (2 раза, сессии № 2, 8), зеркало в каюте в СМ (1 раз, сессия № 3) и корпус за панелью 125 в СМ (1 раз, сессия № 6).

Измерения микробной обсемененности труднодоступных поверхностей интерьера РС МКС являлись важной задачей второй части КЭ «Электронный нос». Именно в «закрытых» местах, к которым в первую очередь относятся запанельные пространства РС МКС, чаще всего происходит скопление конденсата, провоцирующее взрывной рост микроорганизмов и их дальнейшее аэрогенное распространение с возможной вторичной контаминацией других, в том числе «открытых» поверхностей [5]. Для выполнения такой задачи прибор «Э-НОС» был дополнительно оснащен специально разработанным воздухозаборником, позволяющим проводить измерения на поверхностях, доступ к которым осложняют располагающиеся за панелями кабели и/или другие конструкционные элементы (см. рис., Б).

Также важным условием правильного проведения измерений на «закрытых» поверхностях являлось корректное присоединение воздухозаборника к исследуемой поверхности, подразумевающее соблюдение плотного присоединения, обеспечивающего необходимую герметичность, что исключало попадание в прибор воздуха из газовой среды станции и дальнейшее его смешивание с летучими продуктами метаболизма микроорганизмов. Добиться такого контакта воздухозаборника с поверхностью в условиях невесомости оказалось непростой задачей, и, для того чтобы на Земле была возможность оценить правильность присоединения, космонавт в ходе измерения закрывал на несколько секунд пальцем разъем фильтра прибора. В такой ситуации в случае герметичного присоединения поток проходящего через прибор воздуха прерывался, что отражалось на графиках измерения в виде резкого скачка, который мог служить показателем корректно выполненного присоединения.

Анализ графиков сигналов сенсоров показал, что характерный скачок потока воздуха, указывающий на правильность присоединения воздухозаборника, наблюдался не всегда и при выполнении более половины измерений на труднодоступных поверхностях происходило проникновение в прибор воздуха из газовой среды МКС, что негативно влияло на качество результатов. Данные, полученные в ходе измерений с неплотным присоединением воздухозаборника прибора «Э-НОС», не подлежали анализу и выбраковывались. Всего на «закрытых» поверхностях было проведено 5 измерений, подлежащих статистической обработке, что позволило выявить бактериальную и грибную контаминацию поверхности корпуса за панелью 125 в СМ в ходе сеансов № 5 и 6, а также отсутствие микробного роста за панелями 334, 306 и 125 в ходе сеансов № 2, 4 и 7 соответственно.

Обнаружившиеся трудности присоединения воздухозаборника при измерениях на «закрытых» поверхностях РС МКС выявили недоработки в дизайне прибора «Э-НОС», связанные с особенностями и неудобством работы в невесомости, которые в дальнейшем могут быть исправлены при условии развития данного подхода в области

Таблица 2

Значения микробной обсемененности поверхностей интерьера РС МКС, полученные при использовании стандартных методов микробиологического мониторинга и при измерении прибором «Э-НОС»

Наименование поверхности интерьера РС МКС	Количество микроорганизмов КОЕ/100 см^2	
	Микробиологические пробы	Прибор «Э-НОС»
СМ, зеркало в каюте	29.02.2016** (МКС-46)	30.03.2016***(сеанс № 1)
	Не обнаружены	Не обнаружены
СМ, потолок АСУ	2,5 x 10^3	10^3–10^4
МИМ-1, панель 110	Не обнаружены	Не обнаружены
СМ, зеркало в каюте	16.06.2016 (МКС-47)	30.05.2016 (сеанс № 2)
	3,2 x 10^3	10^3–10^4
СМ, потолок АСУ*	Не обнаружены*	10^3–10^4*
СМ, беговая дорожка	Не обнаружены	Не обнаружены
СМ, зеркало в каюте	05.09.2016 (МКС-48)	01.10.2016 (сеанс № 4)
	1,7 x 10^2	Не обнаружены
СМ, потолок АСУ	3,3 x 10^1	Не обнаружены
СМ, потолок АСУ	27.12.2016 (МКС-49)	31.01.2017 (сеанс № 6)
	1,1 x 10^4	10^3–10^4
СМ, зеркало в каюте*	08.04.2017 (МКС-50)	29.03.2017 (сеанс № 7)
	6,7 x 10^1*	10^3–10^4*
СМ, потолок АСУ	1,8 x 10^4	10^3–10^4
МИМ-1, панель 402*	1,1 x 10^5*	Не обнаружены*
СМ, зеркало в каюте	31.05.2017 (МКС-51)	31.05.2017 (сеанс № 8)
	2,0 x 10^2	Не обнаружены

Примечание. * – случаи несовпадения результатов; ** – дата отбора проб; *** – дата измерений прибором «Э-НОС».

микробиологического мониторинга пилотируемых космических комплексов.

Также большой интерес представляло сравнение разрабатываемого в рамках КЭ подхода с традиционным методом оценки микробной обсемененности поверхностей, который заключается в посеве на питательные среды проб, доставляемых на Землю. Следует отметить, что метод посева на элективные культуральные среды является «золотым стандартом» не только в области микробиологического мониторинга МКС, с помощью этого метода проверяется соответствие санитарным нормативам в любой области, требующей микробиологической чистоты.

Отбор микробиологических проб в соответствии с операцией медицинского контроля РС МКС за время проведения второй части КЭ «Электронный нос» выполнялся 6 раз в завершающие дни работы экспедиций № 46–51. Лабораторные исследования доставленных на Землю проб с использованием регламентированных методик позволили получить результаты, которые можно было бы сопоставить с некоторыми измерениями микробной обсемененности прибором «Э-НОС» (табл. 2). Полноценным контролем результатов, полученных с помощью развиваемого нами инструментального подхода, могли бы служить исследования, выполненные методом посева, в ходе которых микробиологические пробы отбирались бы сразу после измерения прибором и непосредственно с места, к которому был присоединен воздухозаборник прибора. Такие контрольные исследования проводились во время биолого-технических испытаний научной аппаратуры «Э-НОС» в лабораторных условиях перед его отправкой на МКС и показали достоверную корреляцию результатов, полученных этими 2 подходами [9]. Проведение полноценного контроля на МКС во время второй части КЭ оказалось трудновыполнимой задачей из-за экономии времени космонавтов и отдаленности условий работы на станции от удобств работы в лаборатории.

Практика микробиологического мониторинга орбитальных космических комплексов показывает, что микробная загрязненность тех или иных поверхностей сохраняется на том же или более высоком уровне до проведения дезинфекции или устранения причин ее возникновения [1], что делало возможным сравнение результатов 2 методов, полученных с промежутками в несколько недель. В большинстве случаев (10 из 13), когда такое сравнение было возможным, результаты 2 методов совпадали, а расхождение наблюдалось только в 3 случаях (см. табл. 2). Следует отметить, что величины микробной обсемененности поверхностей интерьера МКС, равные 10^1–10^2 КОЕ/100 см^2, очень малы и не определяются прибором «Э-НОС». Такие поверхности с точки зрения микробного загрязнения, согласно нормативам SSP 50260 MORD, считаются чистыми [12], поэтому значения обсемененности, полученные в

лаборатории на уровне, меньше чем 10^3 КОЕ/100 см^2, допустимо считать сопоставимыми с не обнаружениями микроорганизмов прибором «Э-НОС».

Эксперимент «Электронный нос» является первым в своем роде, исследования микробной контаминации поверхностей станции с использованием инструментальных подходов никем и никогда ранее не проводились. В первую очередь это связано с тем, что реализация любого инструментального микробиологического подхода на борту МКС и, следовательно, при любых других дальних КП, осложнена большим количеством факторов. Требования к доставке, хранению и эксплуатации научной аппаратуры на борту станции в большинстве случаев весьма критичны и не подходят для сложного аналитического оборудования, использующегося в ПЦР (полимеразная цепная реакция) диагностики, в проточной цитометрии, в масс-спектрометрии или микроскопии методом FISH (флуоресцентная гибридизация in situ). Все вышеперечисленные инструментальные подходы требуют сложной процедуры подготовки проб, сопряженной с созданием различных водных растворов, что представляется в условиях невесомости практически невозможным. Использование большого количества реагентов в анализах также ограничивает эти методы, так как многие химические вещества запрещены к использованию на борту МКС токсикологическими требованиями [12]. В этом отношении развиваемый нами подход превосходит все остальные перспективные «земные» методы, так как исключает в своем исполнении этапы, связанные с подготовкой проб для анализа, и работу с водными растворами, что значительно упрощает метод и увеличивает скорость получения конечного результата.

Исследования в земных условиях микробной обсемененности приборами, использующими в своей работе полупроводниковые датчики, ранее проводились редко. Обращают на себя внимание две работы, в которых авторам удалось успешно определить различные патогенные бактериальные культуры с помощью таких приборов, как MonoNose и Cyranose 320 [13, 14]. В обоих случаях для интерпретации сигналов сенсоров был применен метод главных компонент, позволивший правильно дифференцировать штаммы исследуемых бактерий, что подтверждало эффективность датчиков в улавливании микробных запахов и потенциал метода в микробиологическом мониторинге такого сложного объекта, каким является МКС.

Перспективными вариантами экспресс-методики в микробиологическом мониторинге пилотируемых космических комплексов (ПКК) являются методы на основе ПЦР технологии. Чувствительность и избирательность, а также огромная база данных делают эти методы передовыми в современных микробиологических исследованиях. Ученым NASA удалось провести впервые ПЦР амплификацию РНК микроорганизмов на борту МКС, однако они использовали подготовленные на Земле субстраты, что значительно облегчило эксперимент, сведя его к переносу астронавтом в портативное оборудование и доставленные на борт объекты исследования и субстраты [15]. Бурное развитие этой технологии на Земле, а также пути решения, связанные с адаптацией метода к условиям МКС, поиском которых занимаются американские и европейские коллеги, позволяют надеяться, что в скором будущем полноценный молекулярно-генетический подход в исследовании микробного сообщества на борту ПКК будет реализован [15, 16].

Чувствительность и избирательность прибора «Э-НОС», безусловно, ниже, чем у ПЦР оборудования, однако существенным минусом последнего можно считать то, что рассчитанный по сути на детекцию микробной нуклеиновой кислоты метод также с большой вероятностью учитывает и мертвые микробные клетки [17]. Рассчитанный же на детекцию летучих низкомолекулярных микробных метаболитов разрабатываемый нами подход, наоборот, определяет только вегетативные клетки микроорганизмов, находящиеся в активном физиологическом состоянии и представляющие основной интерес с точки зрения микробиологического мониторинга и безопасности МКС.

Подводя итог КЭ «Электронный нос», необходимо подчеркнуть перспективу метода, основанного на инструментальной детекции микробных запахов, в микробиологическом мониторинге поверхностей интерьера ПКК и особенно в будущих межпланетных экспедициях. Данный метод может также найти применение в поиске микробных очагов, вызывающих процессы деструкции материалов, а его использование в сочетании с научной аппаратурой БАР, разрабатываемой в рамках КЭ «Эксперт» и нацеленной на поиск микродеструкций в конструкционных элементах МКС [18], может создать высокоэффективный инструментальный подход, направленный на обеспечение безопасности и надежности эксплуатации космической техники. Развивая базу данных прибора «Э-НОС» и совершенствуя процедуру измерения и дизайн научной аппаратуры, в перспективе высоковероятно получить не только удобный и надежный оперативный метод контроля санитарно-микробиологического состояния среды ПКК, но и экспресс-оценки микробиологической обстановки в больничных палатах, полевых госпиталях, а также на производственных предприятиях, требующих соблюдения требований микробиологической чистоты.

Выводы

1. Космический эксперимент «Электронный нос» впервые показал возможность инструментального измерения микробной загрязненности внутренних поверхностей ПКК при длительном КП.

2. С помощью портативной газовой сенсорной системы «Э-НОС» удалось обнаружить как грибную, так и бактериальную контаминацию как легкодоступных, так и «закрытых» поверхностей станции.

3. Результаты, полученные прибором, во многом совпадали с данными микробиологического контроля МКС. Усовершенствования разрабатываемого инструментального подхода позволят создать экспресс-методику микробиологического контроля ПКК при длительных КП.

Список литературы

1. *Novikova N.D., Pierson D.L., Poddubko S.V. et al.* Microbiology of the International space station // US and Russian cooperation in space biology and medicine. Washington, 2009. P. 263–278.

2. *Pierson D.L.* Microbial contamination of spacecraft // Gravit. and Space Biol. Bulletin. 2001. V. 14. P. 1–6.

3. *Castro V.A., Thrasher A.N., Healy M. et al.* Microbial characterization during the early habitation of the International space station // Microbial Ecol. 2004. V. 47. P. 119–126.

4. *Horneck G., Klaus D.M., Mancinelli R.L.* Space microbiology // Microbiol. and Molecular Biol. Rev. 2010. V. 74. P. 121-156.

5. *Викторов А.Н., Новикова Н.Д., Дешевая Е.А.* Микрофлора кабин пилотируемых космических объектов и проблема биоповреждений, используемых в них конструкционных материалов // Авиакосмю и экол. мед. 1992. Т. 26. № 3. С. 41–48.

Viktorov A.N., Novikova N.D., Deshevaya E.A. The cabin microflora of manned space vehicles and the problem of the biological destruction of the construction materials used in them // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1992. V. 26. № 3. P. 41–48.

6. *Gu J.-D., Roman M., Esselman T., Mitchell R.* The role of microbial biofilms in deterioration of space station candidate materials // Int. Biodeter. Biodegr. 1998. V. 41. P. 25–33.

7. *Novikova N.D., De Boever P., Poddubko S. et al.* Survey of environmental biocontamination on board the International space station // Res. in Microbiol. 2006. V. 157. P. 5–12.

8. *Novikova N.D.* Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft // Microbial Ecol. 2004. V. 47. P. 127–132.

9. *Reidt U., Halwig A., Muller G. et al.* Detection of microrganism onboard International space station using an Electronic nose // Gravit. and Space Res. 2017. V. 5. P. 89–111.

10. *Korpi A., Pasanen A.L., Pasanen P.* Volatile compounds originating from mixed microbial cultures on building materials under various humidity conditions // Applied and Environ. Microbiol. 1998. V. 64. P. 2914–2919.

11. *Wilkins K., Larsen K., Simkus M.* Volatile metabolites from mold growth on building materials and synthetic media // Chemosphere. 2000. V. 41. P 437–446.

12. International Space Station Medical Operations Requirements Document (ISS MORD) SSP 50260 Revision C.

13. *Bruins M., Bo A., Petit P.L. et al.* Device-independent, real-time identification of bacterial pathogens with a metal oxide-based olfactory sensor // Eur. J. of Clinical Microbiol. & Infectious Dis. 2009. V. 28. P. 775–780.

14. *Dutta R., Hines E.L., Gardner J.W., Boilot P.* Bacteria classification using Cyranose 320 electronic nose // Biomed. Enginer. OnLine. 2002. V. 1. № 4.

15. *Castro-Wallace S.L., Chiu C.Y., John K.K. et al.* Nanopore DNA sequencing and genome assembly on the International space station // Sci. Rep. 2017. Dec 21. V. 7. № 1. P. 18022.

16. *Boguraev A.S., Christensen H.C., Bonneau A.R. et al.* Successful amplification of DNA aboard the International space station // Micrograv. V. 3. № 26.

17. *Emerson J.B., Adams R.I., Betancourt Román C.M. et al.* Schrödinger's microbes: Tools for distinguishing the living from the dead in microbial ecosystems // Microbiome. 2017. V. 5. № 86.

18. *Deshevaya E.A., Shubralova E.V., Novikova N.D. et al.* Testing and evaluation of a method for locating potentially hazardous sites of eventual microdestruction and detecting marks of ISS RS hull leakage // Acta Astronaut. 2011. V. 68. P. 1555–1559.

Поступила 21.08.2018

INVESTIGATION INTO MICROBIAL CONTAMINATION OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION INTERIOR WITH PORTABLE GAS SENSING SYSTEM «E-NOSE»

Kharin S.A., Novikova N.D., Smirnov Yu.I., Poddubko S.V., Fetter V., Hummel T., Reidt U., Helvig A., Leenich J., Grosser Y.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 81–88

The paper presents results of the second stage of space experiment «Electronic Nose» onboard the International space station (ISS) that was aimed to test a new model of research tool «E-Nose» designed for microbial monitoring of the ISS interior. The tool enables on-site analysis of the composition of gasses produced by bacteria and fungi residing on ISS structural materials. The experiment took eighteen months. Every 2 months a cosmonaut used tool «E-Nose» to measure microbial contamination of easy- and hard-to-reach surfaces and downloaded the data to the investigators on Earth. The total of 8 monitoring sessions resulted in detection of both fungal and bacterial contamination of some ISS surfaces.

Key words: International space station (ISS), bacteria, fungi, microbial contamination, interior and equipment, device «E-Nose».

УДК 573.6+579.26

ФУЗАРИОЗ КАК ФАКТОР РИСКА ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

Тихомиров А.А.[1], Хижняк С.В.[2], Ушакова С.А.[1], Тихомирова Н.А.[1], Павлова А.М.[1]

[1]Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
[2]ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Работа посвящена исследованию возможного спектра и характера протекания заболеваний пшеницы в биолого-технических системах жизнеобеспечения. Растения пшеницы Triticum aestivum L. линии 232, выведенной для использования в замкнутых биорегенеративных системах жизнеобеспечения типа «БИОС-3», выращивали методом гидропоники на жидких продуктах минерализации экзометаболитов человека с возможностью проникновения возбудителей за счет свободного воздухообмена с внешней средой. Установлено, что среди потенциально возможных инфекционных заболеваний наиболее вероятным для пшеницы является фузариоз корней и основания стебля. Поражение растений фузариозом быстро приобретает характер эпифитотии благодаря массовому производству конидий возбудителя (в среднем 1500 конидий на 1 зараженное растение в сутки) и быстрому распространению этих конидий через питательный раствор. Заражение в фазах «прорастание – кущение», как правило, приводит к гибели растений, в более поздних фазах – к падению урожая и/или уменьшению суммарного сухого веса несъедобной биомассы. Появление фузариоза в системе ведет к необходимости удаления всех растений с последующей дезинфекцией вегетационной камеры 6%-ной перекисью водорода и автоклавированием субстрата и раствора при 121 °С. Эффективными профилактическими мерами против фузариоза в биолого-технических системах жизнеобеспечения являются предпосевное протравливание семян тиабендазол-тебуконазоловым фунгицидом «Виал ТрасТ» с последующей регулярной дезинфекцией питательного раствора с помощью устройства Aquapro UV-S.

Ключевые слова: биолого-технические системы жизнеобеспечения, гидропоника, растительный конвейер, фузариоз.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 89–96.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-89-96

В настоящее время ведутся активные исследования по созданию искусственных экосистем. Их частным случаем являются биолого-технические системы жизнеобеспечения человека (БТСЖО) с выращиваемыми гидропонным способом культурными растениями в качестве источника пищи и кислорода для экипажа. Такие экосистемы предназначены для жизнеобеспечения человека в экстремальных условиях, в первую очередь в условиях автономных космических станций на Луне, Марсе и других небесных телах [1–4]. Кроме этого, различные имитационные модели БТСЖО могут быть использованы для моделирования круговоротных процессов в биосфере, а также для экспериментального изучения последствий антропогенного вмешательства в эти процессы [5].

В ходе эксплуатации орбитальных космических станций были выявлены проблемы, связанные со спонтанным развитием посторонней бактериальной и грибной микрофлоры, заносимой экипажем и/или доставляемыми на борт станции расходными материалами [6, 7]. При этом у выделенных на станциях микроорганизмов наблюдалось появление культуральных, биохимических и морфологических отличий от музейных штаммов, что может быть связано с адаптацией к условиям космического полета (КП) [8, 9]. Введение в структуру космической станции растительного звена неизбежно ведет к обострению подобных проблем и порождает риски, связанные с проникновением в систему фитопатогенных микроорганизмов, угрожающих фотоавтотрофному звену системы жизнеобеспечения.

Выращивание растений в БТСЖО имеет ряд ключевых отличий от выращивания в открытом грунте, что, несомненно, должно сужать спектр потенциально опасных возбудителей и оказывать существенное влияние на развитие и распространение заболеваний. К факторам, ограничивающим круг потенциально опасных заболеваний, можно отнести отсутствие на надземных частях растений капельной влаги, необходимой для проникновения бактериальных и грибных возбудителей в растительные ткани; отсутствие таких переносчиков вирусных и микоплазменных (фитоплазменных) заболеваний, как нематоды, клещи и насекомые. К факторам риска можно отнести отсутствие почвенной микрофлоры, служащей естественным барьером для возбудителей болезней корневой системы; стабильная

температура, близкая к температурному оптимуму для большинства возбудителей; периодическое подтопление и осушение корней, благоприятствующее как развитию мицелия, так и формированию органов спороношения у фитопатогенных грибов на подземной части растений; наличие питательного раствора как дополнительного переносчика возбудителей заболеваний; отсутствие севооборота. Фитопатологические риски усугубляются в связи с необходимостью использования в БТСЖО конвейерной системы выращивания растений. Показано, что только конвейерная система благодаря одновременному присутствию в системе разновозрастных растений обеспечивает постоянный уровень ассимиляции CO_2 и производства O_2 фототрофным звеном [1]. В то же время известно, что восприимчивость растений к заболеваниям в значительной степени зависит от возраста [10]. Конвейерное выращивание ведет к тому, что в системе в обязательном порядке присутствуют растения с максимальной восприимчивостью к любому конкретному заболеванию. Такие растения могут служить своеобразными «воротами инфекции», обеспечивающими проникновение возбудителя в систему, его размножение, преодоление иммунных механизмов даже у относительно устойчивых к заболеванию возрастных групп. Для оценки фитопатологических рисков и разработки мер борьбы с этими рисками необходима экспериментальная оценка круга возбудителей, способных колонизовать БТСЖО.

Целью работы был экспериментальный анализ спектра и характера протекания заболеваний пшеницы, как основной культуры для формирования диеты европейского типа в БТСЖО [1, 2, 4], при длительном гидропонном выращивании в условиях, обеспечивающих проникновение возбудителей за счет свободного воздухообмена с внешней средой.

Методика

План исследований включал 2 серии экспериментов, проведенных в вегетационных камерах в условиях интенсивной светокультуры. Тест-объектом в опытах служила пшеница *Triticum aestivum* L., у которой насчитывается не менее 9 бактериальных, 32 вирусных и 50 грибных заболеваний [11], что делает данную культуру хорошим тест-объектом для оценки фитопатологических рисков в БТСЖО. В данной работе объектом исследования служила *T. aestivum* линии 232 селекции Г.М. Лисовского, выведенная для использования в замкнутых биорегенеративных системах жизнеобеспечения типа «БИОС-3» [1].

Первая серия экспериментов проходила в весенне-летний период (апрель – сентябрь), длительность экспериментов составила 6 мес. При проведении вегетационных опытов единственным источником заражения служил естественный инфекционный фон в зоне проведения эксперимента. Этот фон включал следующие возбудители заболеваний пшеницы, развивающиеся на дикорастущих и культурных злаках: *Bipolaris sorokiniana (Sacc.) Shoemaker* – возбудитель обыкновенной корневой гнили, листовой пятнистости и «черного зародыша», *Bipolaris spicifera (Bainier) Suberamanian* – возбудитель листовой пятнистости, *Alternaria tenuissima Samuel Paul Wiltshire* и группа видов *Alternaria infectoria* – возбудители листовой пятнистости, альтернариоза колоса и альтернариоза зерна, *Fusarium spp.* – возбудители корневой гнили, листовой пятнистости, фузариоза колоса и фузариоза зерна; *Stemphylium spp.* – возбудители черни колоса; *Blumeria graminis (DC.) Speer* – возбудитель мучнистой росы пшеницы; *Puccinia recondita Dietel & Holw* – возбудитель бурой ржавчины. Пик содержания спор возбудителей в воздухе пришелся на июль – август. В этой серии экспериментов растения выращивали конвейерным способом методом гидропоники на керамзите в вегетационной камере при круглосуточном освещении. В качестве источника света использовали металлогалогенные лампы ДМЗ-3000 [12], интенсивность излучения которых после прохождения теплопоглощающего водного экрана и потолка вегетационной камеры из оргстекла составляла над посевом растений 690 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$ фотосинтетически активной радиации (ФАР), а доля ультрафиолетового (УФ) излучения находилась в пределах спектрального диапазона 320–400 нм и составляла около 3 % от общего излучения, падающего на растения, причем доля УФ-излучения в области 320–360 нм не превышала 0,6 %. Измерения ФАР проводили с помощью квантометра LI-250A (LiCOR, США), а измерения спектрального состава УФ-излучения – с помощью спектрометра AvaSpec-ULS2048-USB2 (Avantes, Нидерланды). Температуру воздуха в камере поддерживали на уровне 24 ± 1 °С. В качестве питательного раствора использовали раствор, приготовленный на основе минерализованных по методу Ю.А. Куденко экзометаболитов человека [13]. Длительность вегетационного периода одновозрастного ценоза пшеницы составляла 70 сут. Интервал между посевами и, соответственно, уборками созревших растений (шаг конвейера) составлял 7 сут.

Перед началом экспериментов проводили полную дезинфекцию поверхностей в вегетационной камере и стерилизацию субстрата, растворов и сосудов для выращивания растений. Дезинфекцию поверхностей проводили 6%-ной перекисью водорода с последующим микробиологическим контролем стерильности смывов. Субстрат, сосуды и растворы стерилизовали автоклавированием при 121 °С. Визуальный осмотр растений с целью

Таблица 1

Содержание макроэлементов и железа в растворах, использованных при проверке влияния состава питательного раствора на прорастание конидий и на темпы развития заболевания (мг/л)

Элемент	Вариант раствора		
	1*	2*	3*
Ca	285,0	129,9	141,6
Fe	11,48	4,101	4,444
K	288,6	174,1	173,9
Mg	67,41	36,25	41,46
Na	751,4	378,4	315,8
P	42,1	22,13	16,53
S	153,1	41,73	58,84
$N\text{-}NO_3$	86,23	127	100,17

Примечание. * – растворы, приготовленные на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека [13].

выявления симптомов заболеваний проводили ежедневно. Микробиологический контроль растворов и растений проводили 1 раз в 7 сут, а в случае появления симптомов – сразу после их обнаружения. Растворы для микробиологического анализа отбирали из баков и из корнеобитаемой зоны. Растения для микробиологического анализа отбирали в трехкратной повторности из каждой возрастной группы. Выделение и идентификацию возбудителей заболеваний проводили по стандартным фитопатологическим методикам, включающим визуальную диагностику, выделение возбудителей из надземных и подземных органов методом влажной камеры, выделение возбудителей на искусственные питательные среды. В случаях массовой гибели растений в результате развития эпифитотии проводили полную дезинфекцию субстрата, раствора, сосудов и поверхностей в соответствующей вегетационной камере, и осуществляли перезапуск конвейера. Потери от инфекции, согласно принятой в фитопатологии практике, определяли путем сравнения урожая и биомассы больных растений и растений того же конвейера, не имеющих визуальных и микробиологических признаков заболевания (контроль).

Проверку влияния состава питательного раствора на прорастание конидий и на темпы развития заболевания проводили во 2-й серии экспериментов (модельные опыты). Четыре одновозрастных ценоза растений выращивали в тех же условиях, что и в 1-м эксперименте, в отдельной вегетационной камере вне контакта с основным растительным конвейером. Было исследовано 4 типа питательных растворов: раствор Кнопа и 3 варианта растворов, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека, отличающихся по составу (табл. 1). Заражение (растения находились в 10-суточном возрасте от всходов) проводили путем инокуляции предварительно автоклавированных питательных растворов конидиями изолятов возбудителей, выделенных из больных растений и выращенных на искусственной питательной среде.

Численность конидий в растворах определяли прямым счетом с использованием камеры Горяева производства ООО «МиниМед». Если концентрация конидий в растворах была ниже порога, позволяющего использовать счетную камеру, подсчет проводили путем микроскопии серии микрокапель, полученных с использованием микропипет-дозатора, суммарный объем микрокапель составлял 1–2 мл.

В следующем эксперименте проводили анализ влияния УФ-излучения на жизнеспособность конидий фитопатогенных грибов, выделенных из зараженных растений в ходе вегетационных опытов. Анализ проводили путем пропускания искусственно инфицированного питательного раствора, без выращивания растений, через УФ-стерилизатор Aquapro UV-S с последующим определением доли выживших конидий методом прямого проращивания на агаризованной среде Чапека. Теоретическую кривую зависимости между временем экспозиции в стерилизаторе и процентом гибели конидий строили на основе регрессионного анализа экспериментальных данных с подбором коэффициентов в уравнении регрессии методом наименьших квадратов.

Статистический анализ результатов проводили стандартными методами описательной статистики, сравнения средних по критерию Стьюдента, дисперсионного анализа, регрессионного анализа, факторного анализа. В качестве программного обеспечения использовали пакет StatSoft Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

Несмотря на высокое таксономическое разнообразие возбудителей заболеваний пшеницы в окружающей среде, единственными инфекционными заболеваниями, зафиксированными в ходе эксперимента, были заболевания корней и прикорневой зоны стебля, что подтверждает справедливость изложенных выше предположений.

Единственными представителями фитопатогенных грибов, проявившими способность к колонизации растений пшеницы в условиях гидропоники, оказались грибы р. *Fusarium*. После проникновения грибов р. *Fusarium* в систему основным путем передачи инфекции становился перенос конидий питательным раствором. Минимальное время между запуском полностью сформированного конвейера и выявлением *Fusarium* в системе составило 14 сут. Заболевание проявлялось в форме корневой гнили, с поражением сначала корней, а затем подземного междоузлия и основания побегов, затем наблюдался хлороз листьев. Дальнейшее течение заболевания определялось возрастом растения в момент заражения. Заражение в фазах «прорастание – кущение», как правило, сопровождалось гибелью растений (рис. 1, А). Заражение на более поздних стадиях онтогенеза вело к снижению урожая и/или уменьшению суммарного сухого веса несъедобной биомассы (корни, солома и полова) без гибели растений. Так, при развитии симптомов фузариоза в период «выход в трубку – колошение» наблюдалось двукратное падение урожая и биомассы. При развитии заболевания в фазе молочной спелости наблюдалось 30%-ное снижение биомассы без потери урожайности (рис. 2). Наряду с этим, при заражении фузариозом наблюдались изменения структуры урожая и несъедобной биомассы. Факторный анализ показал, что варьирование совокупности биометрических показателей и показателей урожайности пшеницы при гидропонном выращивании на 98,5 % обусловлено варьированием 3 независимых факторов (табл. 2). Приведенные в таблице значения факторных нагрузок с математической точки зрения эквивалентны коэффициентам корреляции биометрических показателей с соответствующими факторами.

С первым фактором тесно связаны такие показатели, как высота растений, высота стебля, общая кустистость, число продуктивных колосков в колосе, озерненность колоса главного побега, сухая масса зерна (кг/м^2) главных побегов, сухая масса (кг/м^2) соломы, половы и корней, масса 1000 зерен боковых побегов. Этот фактор отражает главным образом валовые показатели биомассы и урожайности пшеницы, более-менее синхронно падающие по мере снижения возраста, в котором произошло заражение.

Со вторым фактором тесно связаны такие показатели, как продуктивная кустистость, озерненность колоса боковых побегов, сухая масса зерна (кг/м^2) боковых побегов. Этот фактор можно интерпретировать как степень развития узла кущения (величину «энергии кущения») и эффективность снабжения боковых побегов пластическими веществами в процессе формирования зерна. Для данного фактора характерен неожиданный подъем в случае, если заражение произошло на стадии цветения – созревания зерна. Это может быть связано с перераспределением пластических веществ в пользу боковых побегов при вызванном инфекцией угнетении главного побега, либо с действием грибных гиббереллинов. Известно, что грибы р. *Fusarium* продуцируют гиббереллины [14], а данные фитогормоны, в числе прочего, стимулируют цветение и увеличивают число завязей. Таким образом, при позднем заражении пшеницы фузариозом в условиях гидропонного выращивания потери урожайности главного побега полностью компенсируются за счет повышения урожайности боковых побегов (рис. 3), а снижение продуктивности зараженных растений проявляется лишь в уменьшении несъедобной биомассы (см. рис. 2).

С третьим фактором тесно коррелируют такие показатели, как число колосков в колосе главного побега и масса 1000 зерен главного побега. Минимальное значение данного фактора наблюдается в случае развития инфекции на стадии колошения. Очевидно, это отражает известный в растениеводстве феномен потери колосков в развивающемся колосе под действием стресса, в качестве которого в данном случае выступает инфекция.

В отличие от полевых условий, листовая пятнистость, фузариоз колоса и фузариоз зерна не отмечались, но отмечена также передача инфекции через семена, заражаемые конидиями при обмолоте урожая. В отдельных случаях отмечено формирование конидий на внешне здоровых растениях, что затрудняет раннюю диагностику фузариоза.

При высушивании керамзита возбудитель сохранялся в виде конидий и хламидоспор. Максимальное зафиксированное число конидий в керамзите из-под погибших растений составило 11 750 шт. на 1 г сухой массы. Единственным способом прекращения вспышки заболевания является удаление всех растений с последующей дезинфекцией вегетационной камеры 6%-ой перекисью водорода и автоклавированием керамзита при 121 °С.

Модельные эксперименты показали, что визуально заметное поражение корней наблюдается через 6, а побурение основания стебля – через 11 сут после заражения. Формирование конидий на зараженных растениях начиналось через 8–9 сут с момента заражения. Конидии представлены только макроконидиями, формирующимися на подземной части растения. В среднем зараженное растение производило около 1500 конидий в сутки. Свежеобразованные конидии обладали 100%-ной жизнеспособностью, не имели периода покоя и прорастали после 4–8 ч пребывания в исследуемом растворе (см. рис. 1, Б, В). Состав питательного раствора не оказывал статистически значимого влияния на прорастание конидий и на темпы развития заболевания. На момент появления визуально

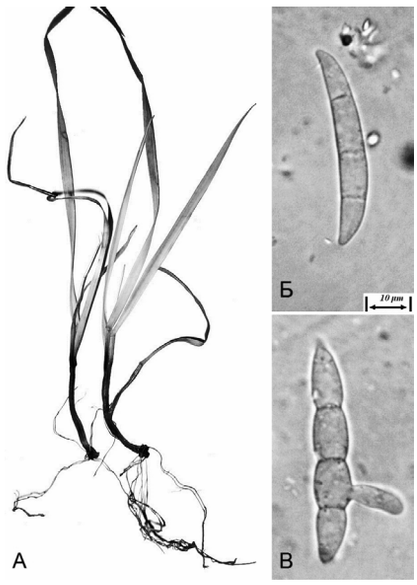

Рис. 1. Фузариоз в вегетационной камере в замкнутой биолого-технической системе жизнеобеспечения: А – растение, погибшее от фузариоза; Б – свежеобразованная конидия р. *Fusarium*; В – прорастающая конидия через 4 ч пребывания в растворе

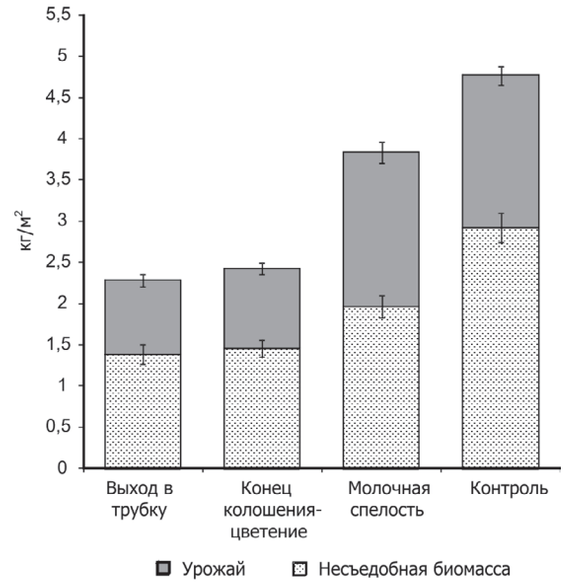

Рис. 2. Сухая масса растений пшеницы, пораженных фузариозом, в зависимости от сроков заражения. Бары на диаграммах обозначают стандартную ошибку при 5%-ном уровне значимости

Таблица 2

Факторный анализ биометрических показателей и показателей урожайности. Метод главных компонент, варимаксное вращение

Показатели		Факторные нагрузки		
		Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Высота, см	растений	0,894*	0,428	0,118
	стебля	0,863*	0,493	0,108
Кустистость	общая	0,991*	-0,095	0,084
	продуктивная	0,404	0,907*	0,063
Число колосков в колосе главного побега	всего	0,242	-0,094	0,962*
	продуктивных	0,908*	0,394	0,027
Озерненность колоса	главного побега	0,990*	0,064	0,128
	боковых побегов	0,275	0,936*	-0,197
Сухая масса зерна, кг/м^2	главных побегов	0,858*	0,213	0,467
	боковых	-0,016	0,973*	-0,208
Сухая масса, кг/м^2	соломы и половы	0,870*	0,155	0,363
	корней	0,962*	0,147	0,205
Сухая масса 1000 зерен, г	главного побега	0,101	-0,220	0,963*
	боковых побегов	0,811*	0,453	-0,318
Информационный вклад фактора, % дисперсии		55,1	25,7	17,7
Накопленный информационный вклад, % дисперсии		55,1	80,8	98,5

Примечание. * – статистически значимые ($p < 0,05$) значения.

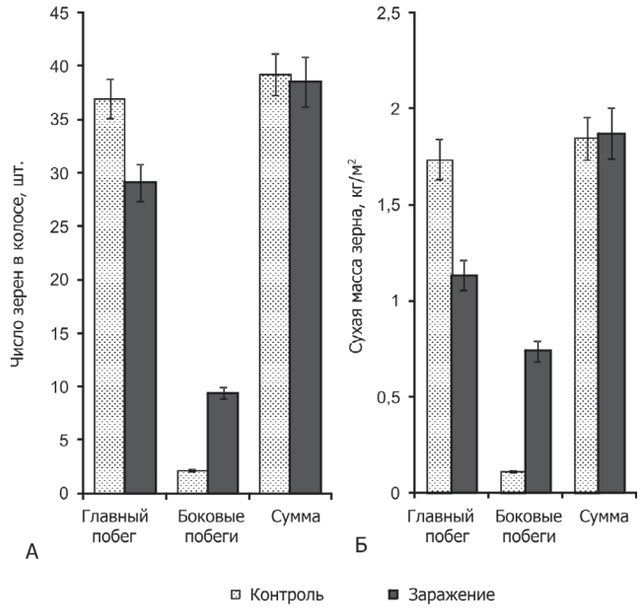

Рис. 3. Соотношение продуктивности главных и боковых побегов при позднем (стадия молочной спелости) заражении пшеницы фузариозом: А – озерненность; Б – урожайность.
Бары на диаграммах обозначают стандартную ошибку при 5%-ном уровне значимости

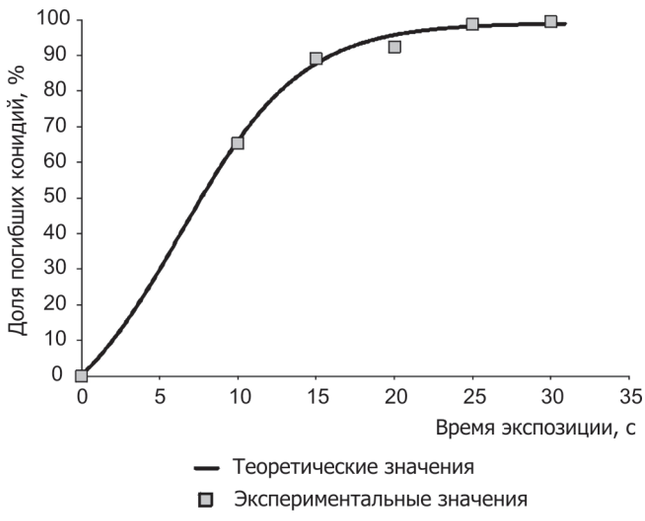

Рис. 4. Влияние времени экспозиции на % гибели конидий фитопатогенных грибов р. *Fusarium* при ультрафиолетовой дезинфекции раствора. Теоретические значения рассчитаны по уравнению (1)

заметных признаков заболевания количество конидий в растворе в вегетационном сосуде достигало 300–1167 шт. на см^3, при официальном экономическом пороге вредоносности 15–60 конидий на 1 г (0,9–1,0 см^3) воздушно-сухой почвы [15]. В связи с этим избирательное удаление заболевших растений не сказывалось на дальнейшем развитии инфекции. Благодаря переносу конидий раствором заболевание быстро охватывало все растения в сосуде. Эксперимент был прекращен, когда все растения были повреждены фузариозом (25 сут от всходов или через 15 сут от заражения раствора).

Эффективными профилактическими мерами, позволившими полностью исключить случаи фузариоза в БТСЖО, оказались предпосевное протравливание семян фунгицидным препаратом «ВиалТрасТ» (действующие вещества – тиабендазол 80 г/л и тебуконазол 60 г/л, производитель – АО «Фирма "Август"»), с последующей регулярной дезинфекцией питательного раствора с помощью УФ-стерилизатора Aquapro UV-S. При дезинфекции питательного раствора с помощью УФ-стерилизатора время нахождения раствора в стерилизаторе должно составлять 25–30 с. Эксперименты с суспензиями конидий *Fusarium* sp. в питательных растворах показали, что зависимость процента погибших конидий *(d)* от времени экспозиции *(t)* в стерилизаторе подчиняется уравнению

$$d = \frac{d_0}{1 + e^{-k(t - t_0)}} + b \ , \qquad (1)$$

где d_0, k, t_0 и b – коэффициенты. После подбора коэффициентов методом наименьших квадратов коэффициент детерминации R^2 составил 0,998 (рис. 4).

При использовании Aquapro UV-S удовлетворительный эффект достигается уже при 20–25 с экспозиции, обеспечивающей гибель соответственно 92,5 и 98,8 % конидий. При экспозиции в течение 30 с доля погибших конидий в растворе составляет 99,5 %. Дальнейшее увеличение времени нахождения раствора в стерилизаторе нецелесообразно в силу выполаживания кривой «доза – эффект». Это выполаживание можно объяснить агглютинацией конидий при времени воздействия ультрафиолета от 25 с и выше. Доля агглютинировавших конидий и размер образовавшихся агрегатов пропорциональны времени нахождения в стерилизаторе, при этом конидии, находящиеся внутри агрегатов, оказываются защищенными от воздействия ультрафиолета. Данный эффект, очевидно, связан с химическими изменениями в растворе и/или на поверхности конидий под действием ультрафиолета и делает дальнейшее увеличение продолжительности УФ-облучения нецелесообразным.

Таким образом, среди имеющегося спектра потенциально возможных заболеваний пшеницы наиболее вероятным и опасным заболеванием в БТСЖО следует признать фузариоз. Появление грибов р. *Fusarium* в системе быстро ведет к развитию эпифитотии и неизбежно приводит к выводу растительного конвейера из эксплуатации. Наряду

с нарушением функционирования фототрофного звена в БТСЖО, фузариоз создает потенциальную угрозу здоровью экипажа. Известно, что грибы р. *Fusarium* продуцируют широкий спектр микотоксинов, таких, как трихотецены, зеараленоны, фумонизины, энниатины, монилиформин, боверицин, фузапролиферин [16]. Эти токсины попадают в организм при употреблении в пищу продуктов, изготовленных из пораженного фузариозом зерна, и в зависимости от вида токсина и его концентрации могут вызывать целый комплекс микотоксикозов – от нарушения работы иммунной системы до отравлений с летальным исходом. Несмотря на то что в ходе исследований не было отмечено поражение зерна фузариозом, наличие грибов р. *Fusarium* в системе может вести к контаминации зерна конидиями этих грибов при обмолоте урожая. В случае хранения контаминированного зерна при повышенной влажности возникает риск накопления указанных микотоксинов за счет сапротрофного роста грибов р. *Fusarium*.

Выводы

1. Несмотря на то что в ходе эксперимента в воздушной среде выявлялся широкий спектр возбудителей болезней пшеницы (*B. sorokiniana, B. spicifera, A. tenuissima, A. infectoria, Fusarium* spp., *Stemphylium* spp., *B. graminis, P. recondita*), только грибы р. *Fusarium* проявили способность к колонизации растений пшеницы в условиях биолого-технических систем жизнеобеспечения.
2. Минимальное время между запуском полностью сформированного конвейера растений и выявлением грибов р. *Fusarium* на пшенице в ходе вегетационных опытов составило 14 сут.
3. Появление грибов р. *Fusarium* в системе неизбежно приводило к развитию эпифитотии за счет распространения формирующихся на зараженных растениях конидий через питательный раствор. В зависимости от фазы онтогенеза, на которой происходило заражение растений, падение продуктивности по биомассе составляло от 33 до 100 %, падение продуктивности по урожаю – от 0 % (в случае заражения на стадии молочной спелости и позже) до 100 %.
4. Эффективными профилактическими мерами, способными полностью исключить случаи фузариоза в БТСЖО, оказались предпосевное протравливание семян фунгицидным препаратом «ВиалТрасТ» с последующей постоянной дезинфекцией циркулирующего питательного раствора в проточном УФ-стерилизаторе Aquapro UV-S, с временем нахождения раствора в стерилизаторе 25–30 с.

Изучение фитопатологических рисков при выращивании пшеницы в БТСЖО выполнены в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных Академий наук на 2013–2020 гг. по теме № 56.1.4 «Оценка устойчивости ценозов высших растений замкнутых экологических систем, включающих человека, к выращиванию на питательных средах из минерализованных органических отходов». Исследования по предотвращению развития Fusarium spp. в БТСЖО с помощью физико-химических средств выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-14-00599П) в ИБФ СО РАН – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН.

Список литературы

1. *Gitelson I.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D.* Manmade closed ecological systems. London; N.Y., 2003.
2. *Lasseur C., Brunet J., De Weever H. et al.* Melissa: The European project of closed life support system // Gravit. and Space Biol. 2010. V. 23. № 2. P. 3–12.
3. *Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Velichko V.V. et al.* Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange // Acta Astronaut. 2011. V. 68. P. 1548–1554.
4. *Fu Y., Li L., Xie B., Dong C. et al.* How to establish a bioregenerative life-support system for long-term crewed missions to the Moon or Mars // Astrobiol. 2016. V. 16. № 12. P. 925–936.
5. *Дегерменджи А.Г., Тихомиров А.А.* Создание искусственных замкнутых экосистем земного и космического назначения // Вестник РАН. 2014. Т. 84. № 3. С. 233–240.

   Degermendzhi A.G., Tikhomirov A.A. Creation of artificial closed ecosystems for earth and space purposes // Vestnik RAN. 2014. V. 84. № 3. P. 233–240.
6. *Алехова Т.А., Александрова А.В., Загустина Н.А. и др.* Микроскопические грибы на российском сегменте Международной космической станции // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. № 5. С. 377–387.

   Alekhova T.A., Alexandrova A.V., Zagustina N.A. et al. Microfungi in the Russian segment of the International space station (ISS RS) // Mikologiya i fitopatologiya. 2009. V. 43. № 5. P. 377–387.
7. *Алехова Т.А., Александрова А.В., Захарчук Л.М. и др.* Микроорганизмы на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) и их возможное влияние на функционирование станции // Интеграл. 2014. № 2–3. С. 26–29.

   Alekhova T.A., Alexandrova A.V., Zakharchuk L.M. et al. Microorganisms on the Russian orbital segment of the International space station (ROS ISS) and possible influence on the working of the station // Integral. 2014. № 2–3. P. 26–29.
8. *Викторов А.Н., Новикова Н.Д., Дешевая Е.А. и др.* Сравнительная оценка биологических свойств микроорганизмов, выделенных в орбитальном комплексе «Мир» в различные сроки эксплуатации // Авиакосм. и экол. мед. 1998. Т. 32. № 2. С. 61–68.

Viktorov A.N., Novikova N.D., Deshevaya E.A. et al. Comparative evaluation of the biological characteristics of microorganisms isolated in the orbital complex «Mir» on different phases of its operation // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1998. V. 32. № 2. P. 61–68.

9. *Викторов А.Н., Новикова Н.Д., Дешевая Е.А. и др.* Резидентное заселение среды на орбитальном комплексе «Мир» *Penicillium chrysogenum* и проблема экологической безопасности в длительном космическом полете // Там же. № 5. С. 57–62.

Viktorov A.N., Novikova N.D., Deshevaya E.A. et al. Residential colonization of the orbital complex «Mir» environment by *Penicillium chrysogenum* and the problem of ecological safety in long-term space flight // Ibid. № 5. P. 57–62.

10. *Panter S.N., Jones D.A.* Age-related resistance to plant pathogens // Adv. in Botanical Res. 2002. V. 38. P. 252–280.

11. *Bockus W.W., Bowden R.L., Hunger R.M., Murray T.D., Smiley R.W.* Compendium of wheat diseases and pests. 3rd ed. St. Paul, 2010.

12. *Левин И.А.* Высокоинтенсивные трехфазные источники света // Светотехника. 1986. № 10. С. 8–10.

Levin I.A. High-intensity three-phase light sources // Svetotekhnika. 1986. № 10. P. 8–10.

13. *Ushakova S.A., Tikhomirov A.A., Tikhomirova N.A. et al.* A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems // Advances in Space Research (includes COSPAR information bulletin). 2012. V. 50. № 7. P. 932–940.

14. *Shi T.Q., Peng H., Zeng S.Y. et al.* Microbial production of plant hormones: Opportunities and challenges // Bioengineered. 2017. V. 8. № 2. P. 124–128.

15. *Алехин В.Т., Михайликова В.В., Михина Н.Г.* Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур: Справочник. М., 2016.

Alekhin V.T., Mikhailikova V.V., Mikhina N.G. Economic thresholds of harmfulness of pests, diseases and weeds in crops: Reference book. Moscow, 2016.

16. *Ferrigo D., Raiola A., Causin R.* Fusarium toxins in cereals: occurrence, legislation, factors promoting the appearance and their management // Molecules. 2016. № 21. P. 1–35.

Поступила 04.07.2018

FUSARIUM ROOT ROT AS A RISK FACTOR FOR CULTIVATING WHEAT IN ARTIFICIAL ECO-SYSTEMS

Tikhomirov A.A., Khizhnyak S.V., Ushakova S.A., Tikhomirova N.A., Pavlova A.M.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 89–96

The paper deals with a spectrum and course of wheat diseases in bio-technical life support systems. Wheat Triticum aestivum L. strain 232 grown specifically for closed bio-regenerative life support systems was cultivated hydroponically on liquid products of human exometabolites mineralization with a risk of agents' penetration via open air exchange. It was found out that Fusarium root rot of roots and stem base is the most probable infectious disease of the wheat. Affection by Fusarium turns very soon into epiphytoty because of massive production of conidia (1500 conidia per an infected plant a day on the average) and their rapid dissemination through nutrient solution. Infection during sprouting and tillering typically leads to death and on late phases, to falling yield and/or reduction of the total dry weight of uneatable biomass. Advent of Fusarium necessitates removal of all plants and ensuing plant chamber disinfection with 6 % hydrogen peroxide as well as substrate and solution placement in autoclave at 121 °C. Fusarium infection can be prevented by presowing treatment of seeds with fungicide «VialTrasT» and regular nutrient solution disinfection with Aquapro UV-S.

Key words: bio-technical life support systems, hydroponics, plant conveyer, *Fusarium*.

УДК 57.084

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ СОЛОМЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЯ ПШЕНИЦЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НА ПОЧВОПОДОБНОМ СУБСТРАТЕ

Величко В.В., Ушакова С.А., Трифонов С.В., Тихомиров А.А.

Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

E-mail: vladimir_velitchko@hotmail.com

Изучали влияние различной степени минерализации соломы пшеницы перекисью водорода под действием переменного электрического тока на процессы роста и развития растений пшеницы при выращивании на почвоподобном субстрате. Экспериментальные смеси соломы окисляли перекисью водорода в реакторе до полного разрушения H_2O_2. Недоокисленные осадки вносили в почвоподобный субстрат перед посевом растений, а супернатанты служили корректирующими растворами для поддержания в ирригационных растворах концентрации азота на уровне 150–200 мг/л. Установлено, что внесение недоокисленных продуктов физико-химической минерализации соломы пшеницы в почвоподобный субстрат приводило к снижению урожая зерна. Ингибирующее воздействие на выращиваемые растения было тем больше, чем более недоокисленны были продукты физико-химического окисления соломы. Отсутствие отрицательного влияния на рост и развитие растений наблюдалось только при максимально возможной («полной») минерализации соломы, что способствовало увеличению урожая пшеницы.

Ключевые слова: почвоподобный субстрат, физико-химическое окисление, пшеница *Triticum aestivum*, биолого-техническая система жизнеобеспечения.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 97–103.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-97-103

Среди культур, предлагаемых для включения в состав звена высших растений в биолого-технических системах жизнеобеспечения (БТСЖО), особое место занимает пшеница, являющаяся одним из основных источников углеводов в европейской диете питания [1]. В БТСЖО ее посевная площадь может доходить до 65 % от всех площадей, занимаемых растениями [2]. Так как доля несъедобной биомассы в выращиваемых растениях пшеницы составляет примерно 55 %, при создании БТСЖО высокой степени замкнутости встает вопрос об утилизации этой биомассы и возвращения в массообменные процессы соединений, входящих в ее состав.

Одним из способов утилизации отходов растительного происхождения внутри БТСЖО является использование почвоподобного субстрата (ППС), представляющего собой продукт биоконверсии утилизируемой растительной биомассы с помощью грибов, червей и микрофлоры [3]. Полученный таким образом ППС в дальнейшем служит не только биореактором для утилизации растительных отходов, но и является корнеобитаемой средой для выращивания на нем растений [4].

Выращивание растений в конвейерном режиме на ППС предполагает, что перед посевом новой партии семян после очередной уборки урожая в субстрат должны быть внесены несъедобные растительные остатки. Вносимые растительные остатки в ППС состоят из 2 частей. Одна из них – несъедобная биомасса только что убранных растений, выращенных на ППС, другая – несъедобная биомасса растений, выращенных методами гидропоники. Эта дополнительная растительная биомасса необходима для компенсации выноса минеральных элементов со съедобной биомассой только что убранного урожая, выращенных на ППС растений. При отсутствии такой компенсации произойдет истощение ППС и снижение урожайности выращиваемых растений.

В Институте биофизики СО РАН (г. Красноярск) разрабатывается модель БТСЖО, в которой для решения проблемы повышения замкнутости массообменных процессов за счет утилизации внутри системы растительных остатков и экзометаболитов человека одновременно используются 3 способа культивирования растений: метод гидропоники на нейтральном субстрате с использованием жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека для приготовления питательных растворов для выращивания пшеницы; метод водной культуры солеустойчивых овощных растений для частичного обессоливания питательного раствора, используемого для выращивания пшеницы и вовлечения в массообмен NaCl, и культивирование овощных растений на ППС с периодическим внесением в него всех растительных остатков, полученных в БТСЖО [5, 6]. Такая организация корневого питания растений позволяет использовать несъедобную биомассу растений, выращенных методом гидропоники, для

возмещения минеральных элементов, вынесенных из ППС со съедобной массой овощей. Но в ранее проведенных исследованиях было показано, что внесение сухой соломы в ППС приводило к снижению продуктивности выращиваемых на нем растений [7]. Это было связано с постепенным истощением почвенного пула минеральных элементов из-за дисбаланса в потоках между их поглощением вегетирующими растениями и восполнением за счет биоконверсии растительных остатков биотой ППС.

Одним из решений быстрого восполнения пула минеральных элементов в ППС могла бы быть предварительная частичная или максимально возможная («полная») минерализация вносимой в субстрат растительной биомассы за счет физико-химических методов. В ИБФ СО РАН (г. Красноярск) был разработан оригинальный метод разложения органических отходов перекисью водорода под действием переменного электрического тока [8]. Благодаря воздействию тока молекулы перекиси водорода распадаются на реакционно-способные радикалы типа ·OH, ·O и т.п., которые способны разрушать соединения с низкой химической реакционной способностью [9–11]. В зависимости от количества используемой перекиси водорода на единицу сухой растительной биомассы можно получить как «полную», так и частичную минерализацию растительных отходов [12].

Целью работы явилось изучение влияния продуктов минерализации соломы на восстановление пула доступных минеральных элементов в почвоподобном субстрате и урожай пшеницы в зависимости от степени минерализации.

Методика

Объект исследования и условия выращивания растений

В качестве тест-культуры была выбрана пшеница *Triticum aestivum* L. линии 232 селекции Г.М. Лисовского, выведенная специально для условий БТСЖО [1]. Растения культивировали при круглосуточном освещении интенсивностью 690 μмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$ фотосинтетически активной радиации (ФАР) на уровне верхних листьев. Длительность вегетации растений составляла 70 сут от момента посева до созревания. Для освещения посевов были использованы светодиодные облучатели (АСС-300, Россия), имеющие цветовую температуру 4000 К. Полив осуществляли методом подтопления ППС один 1 в сутки, после чего ирригационные растворы стекали самотеком в отдельные поливочные баки. Исходным раствором служила дехлорированная водопроводная вода. После полива каждый ирригационный раствор доводили до первоначального объема дехлорированной водопроводной водой. Таким образом, ирригационные растворы состояли из дехлорированной водопроводной воды с экстрагированными из ППС соединениями. Растения выращивали при естественной концентрации CO_2 в вегетационной камере при температуре 24 ± 1 °С и относительной влажности воздуха не более 60 %.

Подготовка ППС

Исходный ППС был получен из соломы пшеницы методом, описанным в работе [3]. Содержание минеральных элементов в исходном ППС, а также доля их доступности для растений приведена в табл. 1. Для снижения количества минеральных элементов, находящихся в субстрате в доступной для растений форме, на исходном ППС была выращена пшеница линии 232 селекции Г.М. Лисовского при условиях культивирования, описанных выше. Предварительное выращивание растений привело к снижению количества доступных для корневого питания растений почти всех макроэлементов, но особенно значительно уменьшилось содержание доступных форм азота ($N\text{-}NO_3^-$ и $N\text{-}NH_4^+$) (см. табл. 1).

Минерализация пшеничной соломы

Для физико-химической минерализации была взята солома пшеницы, выращенная методом гидропоники на керамзите среде Кнопа в условиях интенсивной светокультуры. Солому высушивали, измельчали и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Затем навески по 70 г просеянной соломы смешивали с раствором перекиси водорода. Количество используемой соломы для приготовления смесей было взято из расчета получаемого урожая пшеницы, выращенной методом гидропоники на керамзите с использованием жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека с площади 0,032 м^2. Исходя из того, что для «полной» минерализации 1 г соломы необходимо 18 мл 36%-ного раствора перекиси водорода [13], для эксперимента были приготовлены пропорции смесей соломы и H_2O_2, указанные в табл. 2.

После приготовления смесей проводили физико-химическое окисление соломы в течение 6–13 ч до полного разложения перекиси водорода в реакторе. Так как после «мокрого» сжигания во всех вариантах оставался недоокисленный осадок, его отделяли от надосадочного раствора путем центрифугирования при 5000 об/мин в течение 10 мин. Осадок вносили перед посевом растений в ППС, где должно было происходить его дальнейшее доокисление микробиотой субстрата. Супернатанты начинали вносить только после понижения концентрации водорастворимых форм азота в растворах ниже уровня 150 мг/л. Минеральный состав осадков и супернатантов приведен в табл. 3. Контролем служил вариант без внесения соломы в истощенный субстрат.

Статистическая обработка полученных результатов была проведена при помощи программы EXCEL.

Таблица 1

Содержание макроэлементов в ППС и соломе пшеницы (ошибка не более 10 % от измеряемой величины)

Образец	N			S	P	K	Ca	Mg
	$N\text{-}NO_3^-$	$N\text{-}NH_4^+$	N-вос*					
Исходный ППС, мг/г сухого субстрата	4,2	0,01	26,3	5,6	8,7	13,8	72,5	7,2
Доля доступного для растений минерального элемента** в исходном ППС, %	13,8			86,7	65,1	95,2	95,4	91,2
Истощенный ППС, мг/г сухого субстрата	1,1	0,01	25,9	5,3	7,7	8,9	77,5	7,6
Доля доступного для растений минерального элемента в истощенный ППС, %	4,1			60,9	68,4	83,6	73,4	61,6
Солома пшеницы, мг/г сухой соломы	13,6			2,6	5,7	18,8	7,8	1,5

Примечание. * – N-вос – общий азот по Кьельдалю; ** – количество доступных для корневого питания растений элементов в ППС определили исходя из содержания соответствующих элементов в водной и слабокислой вытяжках из субстрата в соответствии с принятой методикой [12]. Долю доступного для растений минерального элемента рассчитывали в % от общего содержания элемента в ППС.

Таблица 2

Рабочие смеси соломы пшеницы и H_2O_2, используемые в эксперименте

Количество H_2O_2, мл/г соломы	Объем смеси на 70 г соломы, мл	Концентрация H_2O_2, % по объему			
		0	9	18	36
0	0	Вариант А*			
1,62	1260		Вариант Б		
3,24	1260			Вариант В	
3,24	630				Вариант Г
4,86	945				Вариант Д
6,48	1260				Вариант Е

Примечание. * – вариант А – вариант с нулевой минерализацией соломы, внесенной в ППС перед посевом пшеницы.

Таблица 3

Содержание макроэлементов в продуктах минерализации соломы пшеницы разной степени окисленности (ошибка всех измерений составила не более 10 % от измеряемой величины)

а) В жидкой фракции продуктов минерализации соломы, мг/л.

Образец	Объем, л	N			S	P	K	Ca	Mg
		$N\text{-}NO_3^-$	$N\text{-}NH_4^+$	N-вос*					
Супернатант варианта Б	1,260	28	324	435	93	85	900	145	101
Супернатант варианта В	1,260	55	372	550	98	89	840	81	102
Супернатант варианта Г	0,467	116	928	1241	300	590	1515	19	201
Супернатант варианта Д	0,710	168	537	829	222	244	1497	14	49
Супернатант варианта Е	1,093	127	407	560	147	100	1090	9	2

б) В твердой фракции продуктов минерализации соломы, % от сухой массы.

Образец	Сухая масса, г	N-вос*	S	P	K	Ca	Mg
Осадок варианта Б	51,238	0,57	0,16	0,52	0,28	0,96	0,01
Осадок варианта В	21,952	0,43	0,22	1,31	1,16	2,21	0,02
Осадок варианта Г	10,126	1,98	0,44	0,89	3,94	5,52	0,33
Осадок варианта Д	6,271	1,32	0,2	2,63	1,84	8,18	1,39
Осадок варианта Е	6,161	0,92	0,1	4,47	1,16	8,91	1,98

Примечание. * – N-вос – общий азот по Кьельдалю.

Результаты и обсуждение

Внесение супернатантов в варианте Б началось через 14 сут от посева, в варианте В – через 21 сут, в варианте Г – через 28 сут, в вариантах Д–Е – на 35-е сутки (рис. 1). Супернатанты вносили порциями в питательные растворы для поддержания в них концентрации азота на уровне около 150–200 мг/л. Из-за того, что в супернатантах соотношение нитратной и аммонийной форм азота сдвинуто в сторону последней (см. табл. 1), в питательных растворах шло постепенное увеличение содержания аммония. Максимум его содержания совпадал с моментом прекращения подачи коррекции (см. рис. 1), после чего шло быстрое снижение и к завершению эксперимента не отмечали достоверных различий между всеми исследуемыми вариантами.

Содержание нитратных форм азота в питательных растворах в первые 35 сут имело тенденцию к снижению, причем наибольшие темпы были отмечены в контроле и вариантах, где в ППС вносили большое количество соломы (варианты А–В). Внесение коррекции в виде супернатантов способствовало определенной стабилизации содержания нитратного азота в питательных растворах вариантов Г–Е, тогда как в вариантах Б и В шло его дальнейшее снижение. Однако после окончания внесения коррекций в вариантах Б–Г отмечали достоверное увеличение содержания нитратов в питательных растворах, что, вероятно, было связано с интенсификацией процессов нитрификации по сравнению с вариантами Д и Е.

Внесение сухой соломы в ППС варианта А привело к увеличению урожая зерна в 2,1 раза по сравнению с контролем, но достоверно не повлияло на массу соломы, в результате коэффициент хозяйственной годности ($К_{хоз}$) увеличился в 1,5 раза. Влияние внесения продуктов минерализации в ППС на урожай пшеницы зависело от степени минерализации. Так, в варианте Б (минимальная степень минерализации соломы) происходило угнетение процессов роста растений, что выразилось в снижении их массы и особенно значительном падении урожайности зерна ($К_{хоз}$ составил 4,7 %) по сравнению с контролем и вариантом А. В варианте В внесение в корнеобитаемую среду продуктов с увеличенной степенью минерализации приводило к повышению урожайности растений по сравнению с вариантом Б, но достоверных отличий урожайности растений варианта В и контрольного варианта не наблюдалось. Более того, она была ниже, чем в варианте А. Биомасса растений и урожай зерна варианта Г и, следовательно, $К_{хоз}$ оказались близки к этим показателям варианта А. Только в вариантах Д и Е масса растений и урожай зерна стали достоверно выше, чем в варианте А (рис. 2). При этом в варианте Е значение $К_{хоз}$ (42,4 %) было максимальным по сравнению со значениями $К_{хоз}$ в остальных вариантах.

Внесение продуктов различной степени минерализации оказало достоверное влияние на морфологию растений и процесс формирования колоса

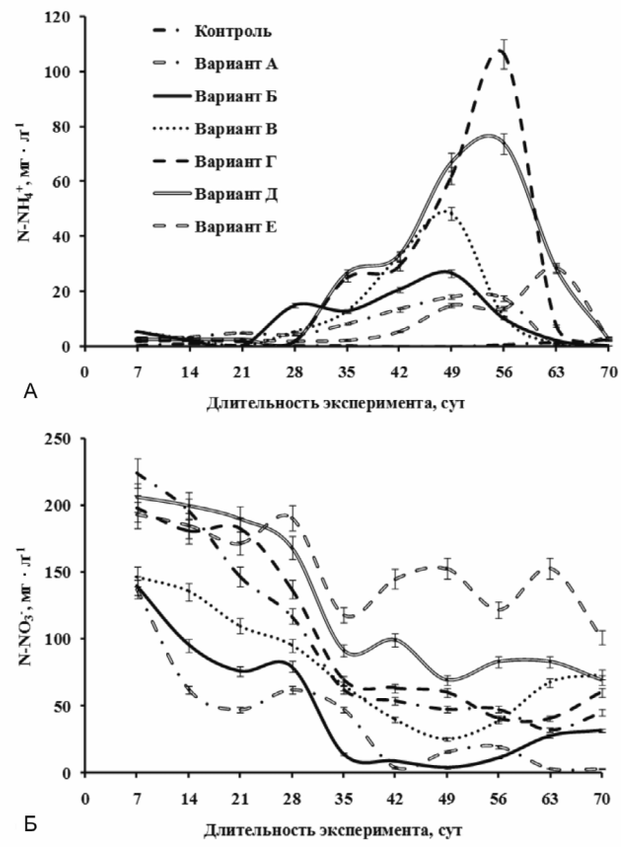

Рис. 1. Динамика различных форм азота в ирригационных растворах экспериментальных вариантов.
А – аммонийные формы азота; Б – нитратные форы азота

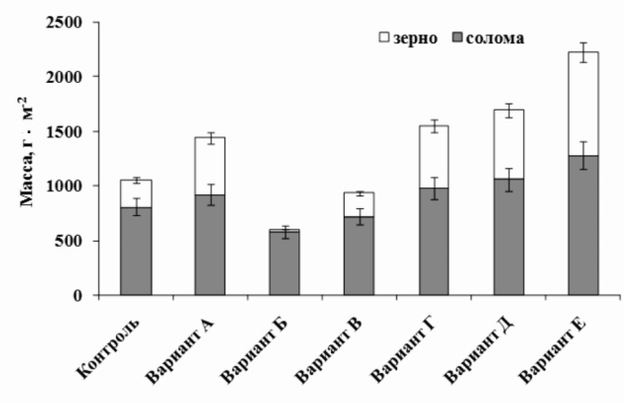

Рис. 2. Урожай пшеницы, выращенной при комбинированном использовании биологического и физико-химического методов окисления растительной биомассы

Таблица 4

Морфологические параметры пшеницы, выращенной при различном минеральном питании (ошибка не более 10 % от измеряемой величины)

Варианты	Высота, см			Количество побегов, шт.		Количество колосков в колосе главного побега, шт.		Масса 1000 зерен, г
	главного побега	стебля главного побега	колоса главного побега	всего	продуктивных	всего	продуктивных	
Контроль	45,7[a]	39,9[a]	5,8[a]	2,6[a]	2,0[a]	12,6[a]	11,1[a]	22,2[a]
А	49,6[a]	44,1[a]	5,5[a]	2,0[b]	1,1[b]	14,9[a]	12,5[a]	22,4[a]
Б	32,4[b]	28,1[b]	4,3[b]	2,1[b]	1,2[b]	9,8[b]	1,1[c]	21,2[a]
В	43,4[a]	38,0[a]	5,4[a,b]	2,4[a]	1,7[a,b]	11,6[a]	6,9[b]	22,3[a]
Г	46,6[a]	40,6[a]	6,1[a]	2,1[b]	1,5[b]	13,4[a]	8,5[b]	25,7[a,b]
Д	48,2[a]	42,0[a]	6,3[a]	2,0[b]	1,4[b]	14,9[a]	12,8[a]	22,4[a]
Е	46,4[a]	40,6[a]	5,9[a]	2,9[a]	2,6[a]	14,1[a]	12,3[a]	29,2[b]

Примечание. Достоверные различия при уровне $p < 0,05$ в каждом столбце отмечены разными буквами.

вариантов Б и В (табл. 4). Так, в варианте Б на 22 и 34 % уменьшилось количество колосков в колосе главного побега по сравнению с контролем и вариантом А соответственно и почти все колоски оказались стерильными. В варианте В количество колосков в колосе оказалось на 22 % меньше, чем в варианте А, но часть из них были недоразвиты. В результате число продуктивных колосков было на 38 и 45 % меньше, чем в контроле и варианте А соответственно. Внесение продуктов более высокой степени минерализации соломы (варианты Г–Е) не оказало существенного влияния на морфологию растений по сравнению с контролем и вариантом А, но в варианте Г количество продуктивных колосков было меньше, чем в контроле и варианте А. Положительное влияние на процесс формирования зерна оказало внесение в корнеобитаемую среду только полностью минерализованной соломы: количество продуктивных побегов в 1,3 и 2,4 раза было соответственно больше по сравнению с контролем и вариантом А, при этом и масса 1000 зерен увеличилась на 30 %.

Реакция растений пшеницы на внесение в ППС продуктов физико-химической минерализации соломы пшеницы перекисью водорода под действием переменного электрического тока по сравнению с внесением сухой соломы пшеницы зависела от степени минерализации соломы. Внесение в корнеобитаемую среду продуктов минерализации соломы с наименьшей степенью окисленности приводило к угнетению процессов роста и развития растений пшеницы. Увеличение степени минерализации соломы сопровождалось снижением ингибирования ростовых процессов, но только в варианте Д наблюдалось некоторое увеличение урожая пшеницы по сравнению с вариантом А. Использование продуктов максимальной минерализации соломы приводило к значительному увеличению урожая по сравнению с другими исследованными вариантами использования соломы пшеницы и с контролем.

Известно, что солома пшеницы имеет не только аллелопатические свойства, но и некоторую самотоксичность, способную подавлять прорастание и рост зерновых культур [14, 15]. Например, водный экстракт из соломы пшеницы в концентрации 2–4 % значительно ингибирует прорастание и рост растений [16]. Принимая это во внимание, можно предположить, что в минерализованных растворах вариантов Б–Д содержались недоокисленные вещества ингибирующего воздействия, концентрация которых была тем больше, чем менее окислена солома пшеницы. В подтверждение этого говорит тот факт, что не были отмечены достоверные различия по урожаям зерна и соломы между вариантом А и вариантами Д и Г (см. рис. 2), где условия минерального питания по азоту явно были различны (см. рис. 1). Здесь можно дать несколько вероятных объяснений. С одной стороны, выравнивание продуктивностей растений варианта А с вариантами Г и Д могло быть обусловлено не только дефицитом доступных форм азота для питания растений варианта А в процессе их роста и развития, но и постепенным выходом из внесенной сухой соломы токсичных веществ. С другой стороны, во вносимых супернатантах вариантов Г и Д также содержались некоторые количества недоокисленных соединений, высвобожденных при минерализации соломы, которые могли угнетать процессы роста и развития пшеницы, что вызвало снижение ее урожайности. В вариантах Б и В, где наблюдалось значительное

снижение урожая зерна, количество недоокисленных соединений, видимо, было выше.

Повышение концентрации недоокисленных соединений в супернатантах вариантов Б и В в первую очередь связано с низкой концентрацией перекиси водорода в растворах, использованных для приготовления экспериментальных смесей, и в меньшей степени – от количества перекиси водорода, приходящейся на окисление массы сухого вещества (см. табл. 1, см. рис. 2). Вероятно, это связано с эффективностью использования перекиси водорода при минерализации соломы пшеницы под действием переменного электрического тока. Если в варианте Б перекиси водорода хватило только для высвобождения ингибирующих веществ из соломы, то в варианте В уже шло их частичное окисление, что отразилось на накоплении растительной биомассы (см. рис. 2).

Таким образом, в наших экспериментах было установлено, что использование продуктов неполной минерализации соломы пшеницы перекисью водорода под действием переменного электрического тока не является безвредным для выращивания растений на ППС. В большей мере недоокисленные продукты минерализации соломы пшеницы приводили к снижению урожая зерна, чем соломы. При этом ингибирующее воздействие на выращиваемые растения было тем больше, чем более недоокисленны были продукты в результате физико-химического окисления. Отсутствие ингибирующего эффекта при «полной» минерализации соломы (вариант Е) способствовало увеличению общего урожая пшеницы, тем самым предполагая возможность использования этого метода в реальных БТСЖО. Но постоянное использование «полной» минерализации соломы для выращивания растений на ППС приведет к нарушению его структуры, поскольку сам субстрат представляет собой смесь растительных остатков, находящихся на разных стадиях своего разложения. Оптимальным для гумификации считают соотношение C : N от 20 до 25 [17]. В силу этого использование «полной» минерализации соломы в условиях БТСЖО возможно только эпизодически, для экстренных случаев, например, для выравнивания потребностей растений в минеральных элементах и степенью их доступности в корнеобитаемой среде, когда скорость минерализации внесенных в субстрат растительных остатков будет недостаточна, что приведет к снижению урожая. Однако возможен и другой вариант: утилизируемую солому пшеницы надо разделить на 1 части, 1 часть подвергать «полной» минерализации перекисью водорода, а другую – вносить в ППС для поддержания его структуры. В результате этой стратегии переработки растительных отходов, возможно, будет скомпенсировать отрицательные стороны как биологического, так и физико-химического метода утилизации. Это может стать одной из целей дальнейших исследований по улучшению комбинированного использования методов биологической и физико-химической утилизации растительной биомассы применительно к условиям БТСЖО.

Выводы

1. Внесение продуктов «полной» физико-химической минерализации соломы пшеницы в корнеобитаемую среду при выращивании растений пшеницы на истощенном ППС оказало положительное влияние на рост, развитие и урожай растений по сравнению с другими вариантами эксперимента.
2. Показано, что степень нарушения процессов роста и развития растений пшеницы при выращивании на истощенном ППС зависела преимущественно от степени окисления продуктов физико-химической минерализации соломы пшеницы, внесенных в корнеобитаемую среду: отрицательный эффект был тем сильнее, чем менее были окислены продукты промежуточной минерализации соломы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-14-00599П) в ИБФ СО РАН.

Список литературы

1. Замкнутая система: человек – высшие растения / Г.М. Лисовский, ред. Новосибирск, 1979.

Closed system: man – higher plants / G.M. Lisovskiy, ed. Novosibirsk, 1979.

2. *Gitelson J.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D.* Manmade closed ecological systems. Taylor & Francis Group. London; N.Y., 2003.

3. *Manukovsky N.S., Kovalev V.S., Rygalovet et al.* Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate // Adv. Space Res. 1997. V. 20. P. 1827–1832.

4. *Velichko V.V., Tikhomirov A.A., Ushakova S.A. et al.* Production characteristics of the «higher plants – soil-like substrate» system as an element of the bioregenerative life support system // Ibid. 2013. V. 51. P. 115–123.

5. *Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Velichko V.V. et al.* Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange // Acta Astronaut. 2011. V. 68. P. 1548–1554.

6. *Ushakova S.A., Tikhomirova N.A., Velichko V.V. et al.* Analysis of the gas exchange and water balance in a closed experimental model of the artificial ecosystem intended for an estimated portion of a human // Ibid. 2018. V. 152. P. 105–111.

7. *Ushakova S.A., Tikhomirov A.A., Velichko V.V. et al.* The estimation of the stability of plants constituting the photosynthesizing unit of bioregenerative life support systems

for including them into the plant waste mass exchange // J. of Siberian Federal University. Biology. 2008. V. 1. P. 78–90.

8. *Ushakova S.A., Zolotukhin I.G., Tikhomirov A.A. et al*. Some methods of human liquid and solid wastes utilization in bioregenerative life support systems // Appl. Biochem. Biotechnol. 2008. V. 158. P. 676–685.

9. *Guo J., Al-Dahhan M*. Catalytic wet oxidation of phenol by hydrogen peroxide over pillared clay catalyst // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. V. 42. P. 2450–2460.

10. *Masende Z.P.G.* Catalytic wet oxidation of organic wastes using platinum catalysts. Tanzania, 2004.

11. The UV/Oxidation Handbook. Solarchem Environmental Systems. Markham. Ontario, 1994.

12. Практикум по агрохимии / В.Г. Минеева ред. М., 2001.

Practical work on agrochemistry / V.G. Mineeva, ed. Moscow, 2001.

13. *Kudenko Yu.A., Gribovskaya I.V., Zolotukhin I.G*. Physical-chemical treatment of wastes: a way to close turnover of elements in LSS // Acta Astronaut. 2000. V. 46. № 9. P. 585–589.

14. *Steinsiek J.W., Oliver L.R., Collins F.C*. Allelopathic potential of wheat *(Triticum aestivum)* straw on selected weed species // Weed Sci. Soc. of Am. 1982. V. 30. P. 495–497.

15. *Bruce S.E., Kirkegaard J.A., Pratley J., Howe G*. Impacts of retained wheat stubble on canola in southern NSW // Austral. J. of Agricultural Res. 2005. V. 45. P. 1–12.

16. *Yau Lam, Cho Wing Sze, Yao Tong et al*. Research on the allelopathic potential of wheat // Agricultural Sci. 2012. V. 3. № 8. P. 979–985.

17. *Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Toropova E.Yu. et al.* Healthy soil-phytosanitary basis of non-pesticide crop production // Rus. J. of Agricultural and Socio-Economic Sci. 2015. V. 48. № 12. P. 3–9.

Поступила 04.07.2018

EVALUATION OF THE EFFECT OF STRAW PHYSICAL-CHEMICAL MINERALIZATION ON THE YIELD OF WHEAT GROWN ON SOIL-LIKE SUBSTRATE

Velichko V.V., Ushakova S.A., Trifonov S.V., Tikhomirov A.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 97–103

Effects of various levels of wheat straw mineralization by hydrogen peroxide combined with ac current on wheat grown on a soil-like substrate were studed. Straw mixed with hydrogen peroxide was oxidized in a reactor till full H_2O_2 disintegration. Suboxidized sediments were applied to the substrate before seeding; supernatants were used to maintain the nitrogen content of irrigation solutions at the level of 150–200 mg/l. Application of suboxidized straw mineralization products was found to reduce grain yield. The inhibiting effect on the wheat crop was the more so as the amount of suboxidized sediments increased. This negative effect was not observed and, consequently, the grain yield was high on condition of full straw mineralization.

Key words: soil-like substrate, physical-chemical oxidation, wheat *Triticum aestivum*, bio-technical life support system.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 616.248

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОВАЛЬБУМИН-ИНДУЦИРОВАННОГО АЛЛЕРГИЧЕСКОГО ВОСПАЛЕНИЯ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПАЛИТЕЛЬНОГО ОТВЕТА У МЫШЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭФФЕКТОВ МИКРОГРАВИТАЦИИ В УСЛОВИЯХ АНТИОРТОСТАТИЧЕСКОГО ВЫВЕШИВАНИЯ

Сервули Е.А.[1], Пономарев С.А.[1], Шевченко М.А.[2]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва

E-mail: violet.vulpera@gmail.com

Во время длительных космических полетов возрастает риск сенсибилизации к различным аллергенам. В данной работе была оценена возможность применения краткосрочной модели аллергического воспаления дыхательных путей (АВДП) для оценки особенностей воспалительного ответа у мышей линии BALB/c при моделировании эффектов микрогравитации в условиях антиортостатического вывешивания. Показано, что при индукции аллергического воспаления дыхательных путей в условиях опорной разгрузки, инфильтрация дыхательных путей лейкоцитами и эозинофилия были выражены слабее, чем в модели аллергического воспаления дыхательных путей в отсутствии антиортостатического вывешивания.

Ключевые слова: аллергическое воспаление дыхательных путей, антиортостатическое вывешивание, иммунный ответ, эозинофилы, нейтрофилы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 104–107.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-104-107

При проведении аллергологического обследования космонавтов после полета были выявлены признаки сенсибилизации к различным аллергенам и активация имевшейся сенсибилизации к бактериальным аллергенам в период полета [1]. В связи с этим изучение развития сенсибилизации организма к различным аллергенам, разработка новых подходов к профилактике и лечению аллергических заболеваний у человека в условиях космического полета (КП) приобретает особую актуальность.

Для оценки различных аспектов функционирования врожденного и адаптивного звеньев иммунной системы применяют моделирование действующих факторов КП в наземных условиях с использованием лабораторных животных. Так, для моделирования воздействия микрогравитации проводят эксперименты с антиортостатическим вывешиванием мышей. В этих условиях достигается перераспределение жидких сред организма в краниальном направлении и атрофия мышц задних конечностей, что приводит к изменению функций скелетно-мышечной, сердечно-сосудистой и иммунной систем организма [2, 3]. Было показано, что пребывание в условиях продолжительной опорной разгрузки может привести к развитию гиперчувствительности замедленного типа и увеличению чувствительности к воздействию различных микроорганизмов [4].

Существуют различные модели аллергического воспаления дыхательных путей (АВДП), отличающиеся по природе и составу используемых аллергенов, а также схеме и методу их введения [5]. Наиболее хорошо описана модель с использованием белка-аллергена овальбумина [6].

Цель данного исследования – изучение особенности формирования АВДП в условиях опорной разгрузки. Для этого необходимо было подобрать адекватную модель индуцированного АВДП для применения ее вместе с моделью гравитационной разгрузки. Поскольку при антиортостатическом вывешивании животные находятся в стрессовом состоянии, длительность модели имеет ключевое значение. В данном исследовании было проведено сравнение двух моделей АВДП: длительной и краткосрочной, разработанных с небольшими изменениями на основе существующих схем создания АВДП, а также выполнена проверка эффективности выбранной модели и особенности протекания АВДП в условиях антиортостатического вывешивания [6, 7].

Методика

В работе были использованы самки мышей линии BALB/c массой 18–21 г (питомник РАМН, пос. Андреевка, Московская область, Россия; питомник

лабораторных животных, г. Пущино, Московская область, Россия).

Исследование включало два этапа. На первом этапе проводилось сравнение длительной и краткосрочной модели АВДП в условиях вивария. На втором этапе осуществлялась проверка выбранной модели в условиях антиортостатического вывешивания.

Длительная модель включала интраперитонеальные инъекции аллергена овальбумина в адъюванте (Imject Alum, Thermo Scientific (USA)) для развития системного иммунного ответа (10 мкг на мышь) на 0, 14, 21-й дни эксперимента, с последующими интрафарингеальными введениями 0,1%-ного раствора ОВА в фосфатном буфере (ФБ) (50 мкл на мышь) для развития локального иммунного ответа на 27 и 28-й день эксперимента (50 мкг на мышь). Процедуру эвтаназии животных осуществляли на 29-й день эксперимента [8].

Краткосрочная модель включала интраперитонеальные инъекции аллергена овальбумина в адъюванте (Imject Alum) для развития системного иммунного ответа (10 мкл на мышь) на 0, 14-й дни эксперимента и последующие интрафарингеальные введения 0,1%-ного раствора ОВА в ФБ (50 мкл на мышь) для индукции локального иммунного ответа на 19, 20, 21-й день эксперимента. Процедуру эвтаназии животных осуществляли методом дислокации шейных позвонков на 22-й день эксперимента [9] .

На втором этапе эксперимента с целью моделирования условий опорной разгрузки у грызунов проводилось антиортостатическое вывешивание по методу Ильина-Новикова в модификации Морей-Холтон [3, 10] на весь период проведения эксперимента, составляющий 23 дня.

На первом этапе эксперимента использовались две группы по 6 мышей в каждой: контрольная и группа мышей с АВДП. На втором этапе эксперимента было задействовано 4 группы мышей:

1. Контрольная группа.
2. Группа, находившаяся в условиях гравитационной разгрузки.
3. Группа с АВДП.
4. Группа с АВДП в условиях гравитационной разгрузки.

Для определения общего количества клеток и клеточного состава бронхо-альвеолярного лаважа (БАЛ) после эвтаназии легкие мышей дважды промывали фосфатным буфером по 0,8 мл. Полученный БАЛ центрифугировали при 100 g в течение 5 мин, затем отбирали супернатант. Количество клеток определяли с помощью камеры Горяева («Минимед», Россия). Клетки осаждали на стекло при помощи цитоцентрифуги (ShendonCytospin II, Великобритания), затем препараты окрашивали с помощью набора для быстрого дифференциального окрашивания биопрепаратов «Диахим-Диффквик» («Диахим», Россия). Морфологическое определение клеток проводили с использованием микроскопа Axiovert 40 (Zeiss, Германия).

Все процедуры с животными были одобрены комиссией по биомедицинской этике Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН № 70/2013 от 25.01.2013, № 179/2015 от 21.07.2015 и Государственного научного центра Российской Федерации Института медико-биологических проблем РАН № 497 от 03.07.2018.

Результаты и обсуждение

На первом этапе эксперимента при сравнении длительной и краткосрочной модели АВДП в условиях нормальной опорной нагрузки результаты показали, что увеличение количества введений аллергена и продолжительности модели приводило к достоверному увеличению общего количества клеток в БАЛ (рис. 1, А). При этом процент эозинофилов достоверно не отличался в длительной и краткосрочной модели (см. рис. 1, Б).

Принимая во внимание тот факт, что общее количество клеток и процент эозинофилов в краткосрочной модели достоверно и значительно отличались от этих показателей у контрольной группы мышей (см. рис. 1, А, Б), было принято решение о возможности использования краткосрочной модели АВДП в комбинации с антиортостатическим вывешиванием.

На втором этапе проводились проверка гипотезы о возможности совмещения выбранной модели АВДП и модели опорной разгрузки, а также анализ особенностей АВДП в условиях антиортостатического вывешивания.

Модель АВДП состоит из двух периодов: индукции системного ответа и индукции локального ответа. Для создания условий, максимально приближенных к условиям КП, было принято решение проводить вывешивание на весь период эксперимента, составляющий 23 сут. Подобная постановка эксперимента позволила оценить влияние условий разгрузки опорно-двигательного аппарата на индукцию как системного, так и локального иммунного ответа.

На втором этапе эксперимента были получены следующие результаты. Инфильтрация лейкоцитов в дыхательные пути в модели АВДП в комбинации с антиортостатическим вывешиванием была достоверно выше, чем у мышей из соответствующей контрольной группы – с вывешиванием, но без индуцированного воспаления, однако достоверно снижалась по сравнению с аллергическим воспалением без вывешивания (рис. 2, А). При этом само вывешивание не оказывало влияния на общее количество клеток в БАЛ: этот показатель не отличался достоверно у мышей, подвергавшихся вывешиванию без

индукции АВДП, и контрольной группы мышей (см. рис. 2, А).

Детальный анализ показал, что количество эозинофилов в БАЛ мышей с индуцированным в условиях антиортостатического вывешивания АВДП было достоверно ниже по сравнению с мышами с воспалением, не подвергавшихся вывешиванию (см. рис. 2, В). Частично это можно объяснить увеличением доли нейтрофилов в БАЛ. Однако процент нейтрофилов при воспалении в условиях вывешивания хотя и отличался от этого показателя у мышей с воспалением без вывешивания, но различия были

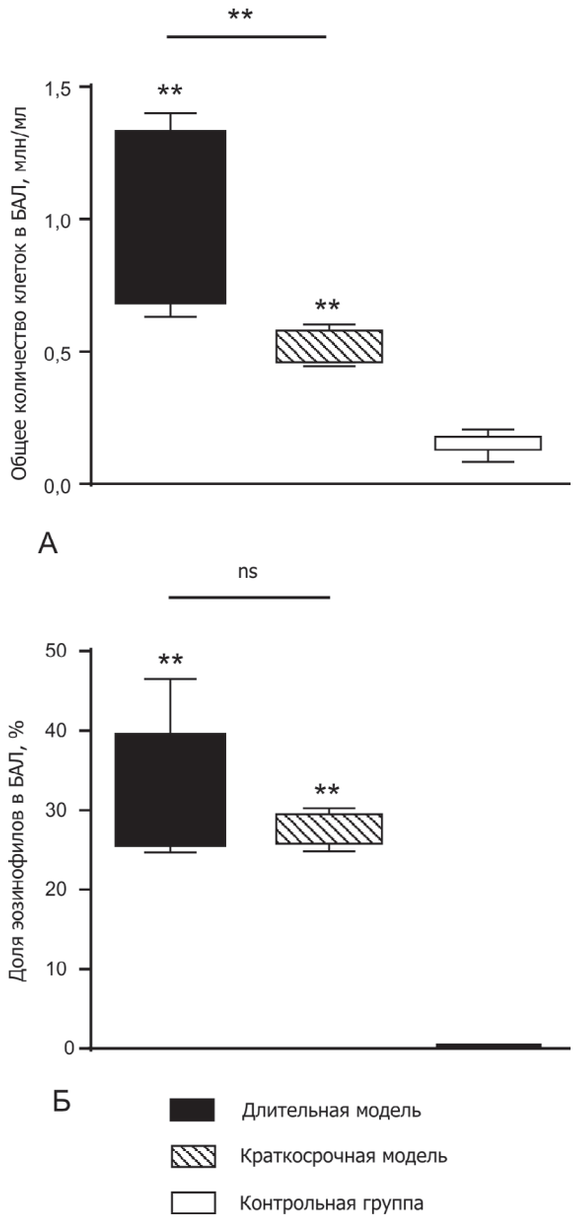

Рис. 1. Сравнение длительной и краткосрочной модели АВДП у мышей: А – общее количество клеток в БАЛ, млн/мл; Б – доля эозинофилов в БАЛ, %.
** – p ≤ 0,01; ns – отсутствие достоверных отличий

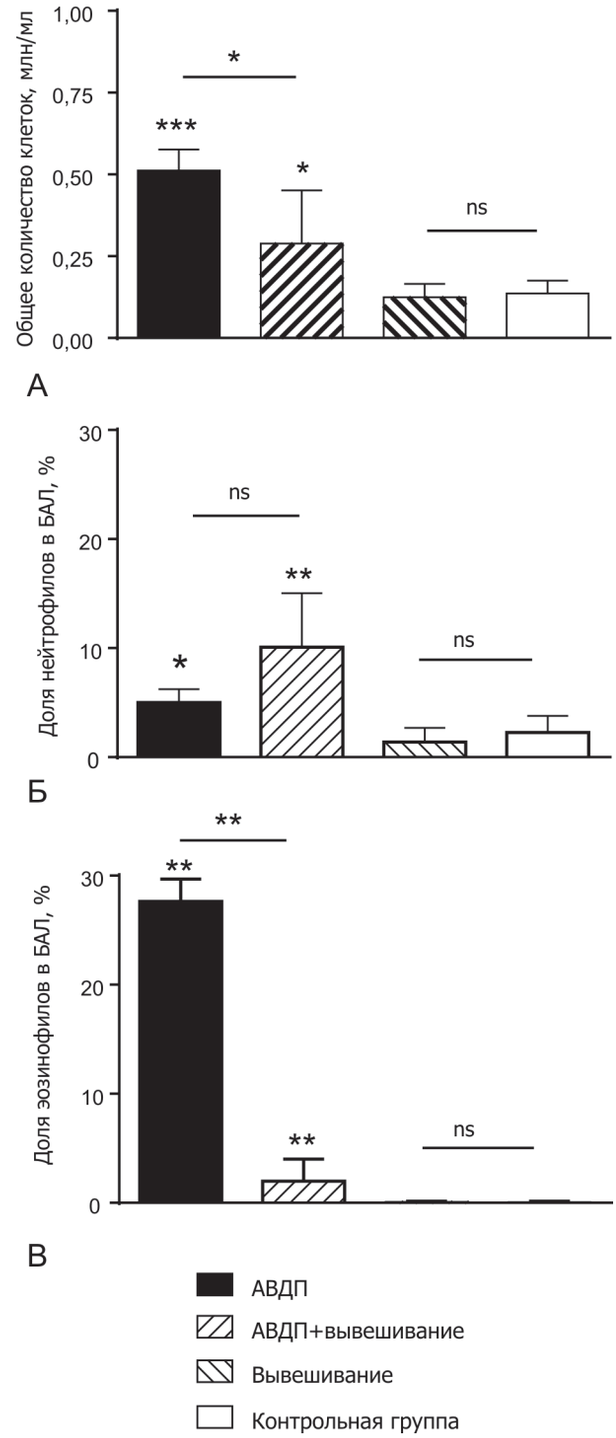

Рис. 2. Влияние антиортостатического вывешивания на интенсивность АВДП у мышей: А – общее количество клеток в БАЛ, %; Б – доля нейтрофилов в БАЛ, %; В – доля эозинофилов в БАЛ, %.
Сравниваются исследуемые группы, контрольные группы (отмечены чертой над столбцами), а также исследуемая и соответствующая ей контрольная группа с вывешиванием и без вывешивания (отмечены * над столбцом).
* – p ≤ 0,05; ** – p ≤ 0,01; *** – p ≤ 0,001; ns – отсутствие достоверных отличий

недостоверны (см. рис. 2, Б). В отсутствии воспаления количество нейтрофилов и эозинофилов в БАЛ у мышей, подвергавшихся вывешиванию, не отличалось от контрольной группы (см. рис. 2, Б, В).

Таким образом, в условиях антиортостатического вывешивания АВДП характеризовалось снижением рекруитмента провоспалительных лейкоцитов в дыхательные пути и менее выраженной эозинофилией.

Ранее авторы работы [11] провели исследование с моделированием АВДП у мышей в условиях опорной разгрузки с вывешиванием только в фазу индукции локального провоспалительного ответа. Несмотря на это, как и в нашем случае, они обнаружили снижение количества эозинофилов и увеличение нейтрофилов в БАЛ.

Выводы

1. Продемонстрирована возможность применения краткосрочной модели АВДП в комбинации с моделью антиортостатического вывешивания. Использование краткосрочной модели позволяет подвергать мышей вывешиванию на весь период индукции воспаления, включающий системные введения аллергена и перевод воспаления в дыхательные пути, что позволяет провести оценку влияния разгрузки опорно-двигательного аппарата как на системные, так и на локальные проявления аллергического воспаления.
2. При индукции АВДП в условиях опорной разгрузки инфильтрация дыхательных путей лейкоцитами и эозинофилия были выражены слабее, чем в модели аллергического воспаления дыхательных путей в отсутствии антиортостатического вывешивания.

Список литературы

1. *Константинова И.В.* Система иммунитета в экстремальных условиях // Космическая иммунология. М., 1988.

Konstantinova I.V. Immune sistem in the extreme conditions // Space immunology. Moscow, 1988.

2. *O'Donnell P.M., Orshal J.M., Sen D. et al.* Effects of exposure of mice to hindlimb unloading on leukocyte subsets and sympathetic nervous system activity // Stress. 2009. V. 12. №1. P. 82–88.

3. *Morey-Holton E., Globus R.K., Kaplansky A., Durnova G.* The hindlimb unloading rat model: literature overview, technique update and comparison with space flight data // Adv. Space Biol. Med. 2005. V. 10. P. 7–40.

4. *Belay T., Aviles H., Vance M. et al.* Effects of the hindlimb-unloading model of spaceflight conditions on resistance of mice to infection with Klebsiella pneumoniae // J. Allergy Clin. Immunol. 2002. V. 110 (2). P. 262–268.

5. *Haspeslagh E., Debeuf N., Hammad H., Lambrecht B.N.* Murine models of allergic asthma // Methods Mol. Biol. 2017. V. 1559. P. 121–136.

6. *Lommatzsch M., Julius P., Kuepper M. et al.* The course of allergen-induced leukocyte infiltration in human and experimental asthma // J. Allergy Clin. Immunol. 2006. V. 118. № 1. P. 91–97.

7. *Idzko M., Hammad H., van Nimwegen M. et al.* Extracellular ATP triggers and maintains asthmatic airway inflammation by activating dendritic cells // Nat. Med. 2007. V. 13. № 8. P. 913–919.

8. *Shevchenko M.A., Bolkhovitina E.L., Servuli E.A., Sapozhnikov A.M.* Elimination of Aspergillus fumigatus conidia from the airways of mice with allergic airway inflammation // Respiratory Res. 2013. V. 14. № 1. P. 78–90.

9. *Shevchenko M.A., Troyanova N.I., Servuli E.A. et al.* Study of immunomodulatory effects of extracellular HSP70 in a mouse model of allergic airway inflammation // Biochemistry. Moscow, 2016. V. 81. № 11. P. 1384–1395.

10. *Ильин Е.А., Новиков В.Е.* Стенд для моделирования физиологических эффектов невесомости в лабораторных экспериментах с крысами // Косм. биология и авиакосм. мед. 1980. Т. 14. № 3. С. 79–80.

Il'in E. A., Novikov V.E. Stand for modeling the physiological effects of weightlessness in laboratory experiments with rats // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1980. V. 14. № 3. P. 79–80.

11. *Jang T.Y., Heo M.J., Jung A.Y., Kim Y.H.* Prolonged anti-orthostatic hind limb unloading and murine allergic asthma // Aerospace Med. and Human Performance. 2015. V. 86. № 9. P. 803–807.

Поступила 14.09.2018

CHOICE OF AN OPTIMAL MODEL OF OVALBUMIN-INDUCED ALLERGIC AIRWAYS INFLAMMATION TO ASSESS THE INFLAMMATORY RESPONSE IN MICE EXPOSED TO TAIL SUSPENDED SIMULATION OF THE EFFECTS OF MICROGRAVITY

Servuli E.A., Ponomarev S.A., Shevchenko M.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 104–107

In long-duration space missions there is a risk of sensitization to various allergens. The investigation was aimed at testing the applicability of induced allergic airways inflammation (IAAI) as a model of the inflammatory response in tail-suspended mice BALB/c. Allergy-induced IAAI in the suspended animals was accompanied by less pronounced airways infiltration by leukocytes and eosinophilia as compared with mice of the laboratory control.

Key words: allergic airways inflammation, tail-suspension, immune response, eosinophils, neutrophils.

УДК 613.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ЛЕТЧИКОВ-ИНСТРУКТОРОВ ПУТЕМ ТРЕНИРОВКИ СТАТИЧЕСКОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

Вонаршенко А.П.[1], Засядько К.И.[1], Солдатов С.К.[2], Богомолов А.В.[2], Язлюк М.Н.[1]

[1]Государственный центр подготовки авиационного персонала и войсковых испытаний Министерства обороны Российской Федерации им. В.П. Чкалова, г. Липецк
[2]Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны России, Москва

E-mail: gniiivm-s@yandex.ru

Целью исследования являлось определение возможностей развития специальных физических качеств летчиков-инструкторов путем тренировки их статической выносливости.

По результатам анкетного опроса 25 летчиков-инструкторов, выполняющих полеты на высокоманевренных самолетах типа Як-52, было установлено, что наиболее важными специальными физическими ПВК являются устойчивость к пилотажным перегрузкам и статическая силовая устойчивость. Для повышения устойчивости пилотов к пилотажным перегрузкам применяли упражнения, направленные на тренировку силы и статической выносливости мышц брюшного пресса и ног.

Изучение влияния изометрических упражнений мышц ног и живота на статическую выносливость летчиков-инструкторов с использованием стенда-тренажера «Статоэргометр» показало, что к концу цикла из 8 тренировок время выдерживания статической нагрузки увеличивалось на 28,2 %, а диапазон времени каждой тренировки увеличивался с 88–132 с до 120–150 с. При этом отмечали снижение энерготрат при выполнении работы, являющееся одним из признаков тренированности организма. Специальные физические упражнения оказали благоприятное воздействие на общее психофизиологическое состояние летчиков-инструкторов, оцениваемое по методике «Самочувствие – Активность – Настроение».

Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности проведения в процессе прохождения летчиками-инструкторами тренировочных сборов курса (2–3 раза в нед) специальных изометрических физических упражнений для мышц ног и живота для повышения переносимости пилотажных перегрузок. Такие тренировки позволят на 7,4–16,0 % снизить выраженность физиологических реакций на статическую нагрузку, что будет способствовать оптимизации профессиональной деятельности летчика-инструктора.

Ключевые слова: специальные физические качества, летчик-инструктор, статическая выносливость, статоэргометрическая проба, физическая подготовка летного состава.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 108–112.

DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-108-112

Для обеспечения высокой эффективности процесса обучения и снижения уровня аварийности в учебных полетах летчик-инструктор должен обладать специальными профессионально важными качествами (ПВК) [1–3]. Результаты исследований ПВК летчиков-инструкторов свидетельствуют о том, что наименее изученными являются специальные физические ПВК, определяющие функциональную надежность профессиональной деятельности в условиях воздействия факторов полета [1, 4]. Интенсивность факторов полета, воздействующих на летный состав воздушных судов, неуклонно повышается, что требует исследования выраженности специальных физических ПВК летчиков-инструкторов в интересах определения их значимости в процессе обучения летчиков, а также определение возможности целенаправленной тренировки этих ПВК.

Для выявления важности специальных физических ПВК для эффективной профессиональной деятельности проведен анкетный опрос 19 опытных летчиков-инструкторов со стажем работы 8–10 лет, имеющих квалификацию специалиста 1-го класса, возраст 35–37 лет и выполняющих полеты на самолетах типа Як-52. Согласно результатам анкетирования, наиболее важными специальными физическими ПВК являются наличие устойчивости к перегрузкам и статической силовой устойчивости. В этой связи для повышения эффективности обучения и обеспечения безопасности полетов важное значение имеют разработка и внедрение в практику летно-методической работы мероприятий, направленных на повышение переносимости летчиком-инструктором пилотажных перегрузок [5–9]. Особую роль среди этих мероприятий занимают средства и методы специальной физической тренировки [10–14].

В соответствии с программой по физической подготовке пилотов маневренной авиации специальными упражнениями для повышения устойчивости пилотов к пилотажным перегрузкам являются упражнения на специальных тренажерах (лопинге,

батуте и др.). Исследования, проведенные в последние годы [9–14], показали, что, наряду с ними, высокую эффективность имеют упражнения, направленные на тренировку силы и статической выносливости мышц брюшного пресса и ног, которые в значительной степени определяют результативность выполнения мышечных противоперегрузочных приемов при действии пилотажных перегрузок направления голова – таз.

Показано, что в процессе тренировки статической выносливости увеличивается анаэробная мощность окислительного метаболизма и наблюдается повышение симпатического тонуса вегетативной нервной системы, также положительно взаимосвязанного с переносимостью акселерационных сил [15]. В соответствии с современными представлениями только комплексное повышение статической выносливости как мышц ног, так и мышц живота позволяет увеличить устойчивость к пилотажным перегрузкам (перегрузкам маневрирования) [5, 11–13].

Несмотря на то что имеется большое число исследований реакций кардиореспираторной системы летчиков на проведение статоэргометрической пробы, такие исследования для летчиков-инструкторов не проводились. Специфические особенности профессиональной деятельности летчиков-инструкторов (кроме всего, на их физическом состоянии негативно отражаются ответственность за результаты обучения курсантов и их безопасность во время полетов) не позволяют экстраполировать ранее полученные результаты на эту категорию летного состава [4, 7]. В связи с этим целью исследования является определение возможностей развития специальных физических качеств летчиков-инструкторов путем тренировки их статической выносливости.

Методика

Изучение влияния изометрических упражнений мышц ног и живота на статическую выносливость летчиков-инструкторов проводили с использованием стенда-тренажера «Статоэргометр» [5, 10]. Для исследования применяли сокращенную статоэргометрическую пробу, рекомендованную к применению для задач врачебно-летной экспертизы [5, 11–14]. Перед началом тренировки летчик-инструктор фиксировал себя привязной системой, а с помощью угломера и системы передвижения педалей устанавливали угол сгиба коленного сустава 120° (при положении на педалях средней части стопы).

Тренировка проводилась 2 раза в нед, в свободное от основной деятельности время, и предполагала выполнение 2 подходов с интервалом 5 мин. В качестве тренировочной использовалась нагрузка величиной 75 % от максимальной выполненной статической работы по данным статоэргометрической пробы [5, 10]. В процессе выполнения тренировки испытуемый двумя ногами создавал ступенчато возрастающее усилие величиной 120, 160, 200 и 240 кгс с удержанием каждого усилия в течение 30 с.

До начала тренировки и после ее окончания на 1, 2 и 3-й минуте с помощью анализатора параметров кровообращения осциллометрического (АПКО-8-РИНЦ-М) регистрировали показатели состояния сердечно-сосудистой системы: определяли частоту сердечных сокращений (ЧСС), величины систолического (АДс) и диастолического (АДд), среднего (АДср), бокового (АДб), конечного (АДк) и пульсового (АДп) артериального давления. Использовали также ряд показателей – общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС) и систолический объем кровообращения (СО).

В исследованиях приняли участие 25 летчиков-инструкторов, выполняющих полеты на высокоманевренных самолетах типа Як-52, в возрасте от 25 до 30 лет (средний возраст – 27 лет), которые показали удовлетворительную переносимость статоэргометрической пробы. Эффективность тренировочного цикла на статоэргометре по повышению статической выносливости летчиков-инструкторов оценивали исходя из положения о том, что тренирующим фактором является не величина, а длительность изометрического напряжения [5]. Поэтому проанализировали влияние тренировочного цикла на длительность выдерживания статической нагрузки.

Статистическая обработка результатов исследования предполагала проверку наличия грубых ошибок с помощью статистического критерия Граббса, расчет среднего арифметического значения и стандартной ошибки и проверку гипотезы о принадлежности сравниваемых независимых выборок к одной и той же генеральной совокупности с помощью критерия Манна – Уитни.

Все обследуемые были ознакомлены с условиями и рисками проводимых тестов и дали Информированное согласие на их проведение.

Результаты и обсуждение

Показано, что проведение тренировок статической выносливости к восьмой тренировке (концу цикла) приводит к увеличению времени выдерживания статической нагрузки со 100 ± 4,5 до 141 ± 4,3 с, т.е. на 28,2 % ($p < 0,001$) преимущественно за счет увеличения времени удержания усилия величиной 240 кгс. Причем если до начала цикла диапазон времени каждой тренировки составлял 88–132 с, то в конце – 120–150 с.

Обращает внимание тот факт, что по мере тренировки имеет место однотипная тенденция изменения показателей, заключающаяся в том, что к 5-й тренировке отмечается снижение ЧСС, АДд, АДср,

Таблица

Динамика изменения ЧСС и АД при проведении статоэргометрической пробы до и после тренировочного цикла

Статистические показатели			До курса		После курса		p
			M	m	M	m	
Фоновые значения		ЧСС	88,7	1,8	83,3	1,6	< 0,05
		АДс	138,2	1,2	132,5	1,2	< 0,05
		АДд	87,2	0,7	82,7	1,1	< 0,05
Значения при ступенчато-возрастающих усилиях	120 кгс	ЧСС	102,2	1,7	97,3	1,6	< 0,05
		АДс	149,6	1,8	145,5	1,6	< 0,05
		АДд	198,3	3,9	90,7	0,7	< 0,05
	160 кгс	ЧСС	111,6	2,2	109,2	1,7	< 0,05
		АДс	164,4	2,3	160,0	2,2	< 0,05
		АДд	103,2	1,1	101,3	1,5	> 0,05
	200 кгс	ЧСС	124,2	1,1	119,5	1,0	< 0,05
		АДс	180,4	1,8	175,1	1,8	< 0,05
		АДд	112,7	0,8	109,7	0,6	< 0,05
	240 кгс	ЧСС	134,6	0,8	129,7	1,1	< 0,05
		АДс	199,5	2,1	191,3	2,2	< 0,05
		АДд	120,2	0,2	117,7	0,2	< 0,05
Значения в восстановительном периоде	1 мин	ЧСС	112,2	1,7	110,7	1,5	> 0,05
		АДс	165,5	1,6	162,8	1,3	> 0,05
		АДд	104,5	1,4	102,2	1,1	< 0,05
	2 мин	ЧСС	91,5	1,7	87,3	1,5	< 0,05
		АДс	145,3	2,1	141,7	2,1	< 0,05
		АДд	90,5	1,2	89,2	1,1	< 0,05
	3 мин	ЧСС	82,2	1,3	80,1	1,0	< 0,05
		АДс	133,7	1,3	131,4	1,1	< 0,05
		АДд	83,4	1,2	81,4	1,1	> 0,05
Оценка			3,8	0,1	4,4	0,1	< 0,05

Примечание. M – математическое ожидание; m – стандартная ошибка; p – статистическая значимость различий средних значений показателей до и после проведения тренировочного цикла.

АДб и АДк при относительном приросте АДп, а к 8-й тренировке наблюдается стабилизация величин всех показателей. Последующая тренировка не приводит к существенным изменениям изучаемых показателей. При этом (таблица) к 8-й тренировке, по сравнению с 1-й, ЧСС снизилась на 16 %, АДср – на 7,4 %, АДб – на 5,6 %, АДк – на 4,8 %, а АДп возросло на 13,4 %.

Следовательно, под влиянием тренировок одну и ту же величину рекомендуемой нагрузки летчики-инструкторы обеспечивали более низким уровнем функционирования сердечно-сосудистой системы. Это характеризует появление экономизации в энергообеспечении выполняемой работы, являющееся одним из признаков тренированности организма [16–20].

В восстановительном периоде после 7–8-й тренировки показатели гемодинамики через 3 мин соответствовали фоновым значениям. Кроме того, отмечался переход регуляции сердечно-сосудистой системы с сосудистого типа на сердечный (как более экономный), что указывало на улучшение функционирования системы кровообращения. Это выражалось в увеличении СО на 14,2 % ($p < 0,05$), АДп – на 12,5 % ($p < 0,05$) и снижении ОПСС в 2,2 раза ($p < 0,01$).

Результаты исследования субъективного состояния летчиков-инструкторов по методике «Самочувствие – Активность – Настроение» показали, что после проведения тренировок статической выносливости отмечается повышение ($p < 0,05$) средних оценок активности (с 5,5 до 6,8 балла) и настроения (с 5,6 до 6,1 балла), при этом средняя оценка самочувствия увеличилась незначительно (с 5,25 до 5,31 балла). Полученные результаты свидетельствуют о благоприятном воздействии

выполнения специальных физических упражнений и на общее психофизиологическое состояние испытуемых.

Выводы

Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности проведения в процессе прохождения летчиками-инструкторами тренировочных сборов курса (2–3 раза в нед) специальных изометрических физических упражнений для мышц ног и живота для повышения переносимости пилотажных перегрузок. Такие тренировки позволят на 7,4–16,0 % снизить выраженность физиологических реакций на статическую нагрузку, что будет способствовать оптимизации профессиональной деятельности летчика-инструктора в части повышения функциональной надежности его профессиональной деятельности при воздействии пилотажных перегрузок.

Список литературы

1. *Жданько И.М., Исаенков В.Е., Ворона А.А. и др.* Профессиональная надежность военного летчика: медицинские и социально-психологические аспекты // Воен.-мед. журнал. 2016. Т. 337. № 6. С. 30–36.

Zhdan'ko I.M., Isaenkov V.E., Vorona A.A. et al. Professional reliability of the military pilot: medical and socio-psychological aspects // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 2016. V. 337. № 6. P. 30–36.

2. *Голубев А.А.* Педагогические условия, необходимые для повышения работоспособности у летчиков-инструкторов вузов гражданской авиации // Ученые записки Университета им. П.Ф. Лесгафта. 2012. № 1 (83). С. 36–39.

Golubev A.A. Pedagogical conditions necessary for improving the working capacity of instructors pilots of civil aviation universities // Uchenye zapiski Universiteta im. P.F. Lesgafta. 2012. № 1 (83). P. 36–39.

3. *Солдатов С.К., Засядько К.И., Богомолов А.В. и др.* Профессионально важные качества операторов управления воздушным движением // Авиакосм. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 1. С. 30–34.

Soldatov S.K., Zasyad'ko K.I., Bogomolov A.V. et al. Professionally important qualities of air traffic control operators // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 1. P. 30–34.

4. *Шайхуллин Т.Д.* Методика комплексного применения средств физической подготовки для повышения уровня работоспособности летчиков-инструкторов армейской авиации // Ученые записки Университета им. П.Ф. Лесгафта. 2009. № 6. С. 93–98.

Shayhullin T.D. The method of complex application of means of physical training for increasing the level of efficiency of aviation instructor pilots // Uchenye zapiski Universiteta im. P.F. Lesgafta. 2009. № 6. P. 93–98.

5. *Вартбаронов Р.А., Хоменко М.Н., Малащук Л.С., Баранова Е.В.* Возможность использования статоэргометрической функциональной пробы в клинической практике // Авиакосм. и экол. мед. 1996. Т. 30. № 2. С. 44–48.

Vartbaronov R.A., Homenko M.N., Malashhuk L.S., Baranova E.V. The possibility of using a static-ergometric functional test in clinical practice // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1996. V. 30. № 2. P. 44–48.

6. *Бухтияров И.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. и др.* Оценка кумулятивных эффектов влияния пилотажных перегрузок на шейный отдел позвоночника методом мета-анализа // Там же. 2001. Т. 35. № 3. С. 18–24.

Buhtiyarov I.V., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V. et al. Estimation of cumulative effects of the effect of pilot overloads on the cervical spine by meta-analysis // Ibid. 2001. V. 35. № 3. P. 18–24.

7. *Люлько О.М.* Медицинские аспекты безопасности учебных полетов // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2009. № 1 (15). С. 82–85.

Lyul'ko O.M. Medical aspects of flight safety training // Aktual'nye problemy transportnoy meditsiny. 2009. № 1 (15). P. 82–85.

8. *Stewart P., Stewart J., Gladwin D., Parr M.* Multi-objective evolutionary-fuzzy augmented flight control for an F16 aircraft // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G // J. of Aerospace Engineering. 2010. Т. 224. № 3. P. 293–309.

9. *Шестаков М.М., Сакиркин О.В.* Физические качества и психические процессы пилотов, важные для эффективного управления самолетом // Ученые записки Университета им. П.Ф. Лесгафта. 2015. № 10 (128). С. 220–223.

Shestakov M.M., Sakirkin O.V. The physical qualities and mental processes of the pilots important for the effective management of the aircraft // Uchenye zapiski Universiteta im. P.F. Lesgafta. 2015. № 10 (128). P. 220–223.

10. *Клишин Г.Ю., Филатов В.Н.* Аппаратно-программное обеспечение статоэргометрического тестирования летного состава маневренной авиации // Проблемы безопасности полетов. 2016. № 4. С. 36–47.

Klishin G.Yu., Filatov V.N. Hardware-software for static-ergometric testing of flight crew of maneuverable aircraft // Problemy bezopasnosti poletov. 2016. № 4. P. 36–47.

11. *Филатов В.Н., Шишов А.А., Оленев Н.И.* Приоритетные направления совершенствования системы психофизиологической подготовки летного состава маневренной авиации // Полет. 2013. № 9. С. 45–50.

Filatov V.N., Shishov A.A., Olenev N.I. Priority directions for improving the system of psychophysiological training of flight personnel of maneuverable aviation // Polet. 2013. № 9. P. 45–50.

12. *Маряшин Ю.Е., Малащук Л.С., Филатов В.Н.* Оценка эффективности комплекса специальных упражнений, направленных на повышение устойчивости летчиков высокоманевренных самолетов к пилотажным перегрузкам // Воен.-мед. журнал. 2014. Т. 335. № 1. С. 54–55.

Maryashin Yu.E., Malashchuk L.S., Filatov V.N. Evaluation of the effectiveness of a complex of special exercises, a direction for increasing the stability of pilots of highly maneuverable aircraft to flight overloads // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 2014. V. 335. № 1. P. 54–55.

13. *Горелов А.А., Лотоненко А.А.* О необходимости научного обоснования специальных задач физической подготовки летного состава Военно-воздушных сил России // Культура физическая и здоровье. 2008. № 5. С. 3–5.

Gorelov A.A., Lotonenko A.A. On the need for scientific substantiation of special tasks for the physical training of the flight crew of the Russian Air Force // Kul'tura fizicheskaya i zdorov'e. 2008. № 5. P. 3–5.

14. *Маряшин Ю.Е., Малащук Л.С., Филатов В.Н.* Влияние различных методов физической тренировки на повышение специальных физических качеств летчиков маневренной авиации // Военно-медицинский журнал. 2018. Т. 339. № 3. С. 61–68.

Maryashin Yu.E., Malashchuk L.S., Filatov V.N. Influence of various methods of physical training on increasing the special physical qualities of maneuverable aviation pilots // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 2018. V. 339. № 3. P. 61–68.

15. *Разинкин С.М., Дворников М.В.* Физиология и гигиена летчика в экстремальных условиях. Саратов, 2017.

Razinkin S.M., Dvornikov M.V. Physiology and hygiene of the pilot in extreme conditions. Saratov, 2017.

16. *Пономаренко В.А.* Теоретические и экспериментальные данные о профилактике безопасности полета. М., 2014.

Ponomarenko V.A. Theoretical and experimental data on flight safety prevention. Moscow, 2014.

17. *Люлько О.М., Ерилкін А.Г., Шмаков В.В.* Використання фізіологічних показників при оцінці придатності льотчиків до льотної діяльності // Військова медицина України. 2008. № 1. С. 109–112.

Lyul'ko O.M., Erilkin A.G., Shmakov V.V. The use of physiological indicators in assessing the feasibility of pilots to flying activities // Viys'kova meditsina Ukraïni. 2008. № 1. P. 109–112.

18. *Ушаков И.Б., Богомолов А.В.* Информатизация программ персонифицированной адаптационной медицины // Вестник Российской академии медицинских наук. 2014. Т. 69. № 5–6. С. 124–128.

Ushakov I.B., Bogomolov A.V. Informatization of personalized adaptation medicine programs // Vestnik Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk. 2014. V. 69. № 5–6. P. 124–128.

19. *Миронов В.В., Приходько П.Н., Тихончук А.А.* Самостоятельная физическая тренировка – важная составляющая здорового образа жизни летного состава дальней авиации // Вестник Тамбовского университета. Сер. Гуманитарные науки. 2015. № 7 (147). С. 62–66.

Mironov V.V., Prikhod'ko P.N., Tikhonchuk A.A. Independent physical training is an important component of a healthy life style for long-range aviation personnel // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Gumanitarnye nauki. 2015. № 7 (147). P. 62–66.

20. *Пухов В.А., Иванов И.В., Чепур С.В.* Оценка функционального состояния организма военных специалистов. СПб., 2016.

Pukhov V.A., Ivanov I.V., Chepur S.V. Assessment of the functional state of the body of military specialists. St.-Petersburg, 2016.

Поступила 11.04.2018

STUDY OF THE POSSIBILITY TO DEVELOP SPECIAL PHYSICAL QUALITIES IN FLIGHT INSTRUCTORS BY STATIC STABILITY TRAINING

Vonarshenko A.P., Zasiad'ko K.I., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Yazlyuk M.N.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2019. V. 53. № 3. P. 108–112

Purpose of the investigation was to study the possibility of strengthening g-tolerance and static stability in flight instructors by abdominal and leg exercises.

After 8 strength training sessions on the Statoergometer machine, the flight instructors extended the static load tolerance by 28.2 % and session length from 88–132 s to 120–150 s. The energy cost, a fitness level criterion, decreased. Besides, specially selected physical exercises had a beneficial effect on the general psychophysiological state assessed with the SAN questionnaire (the self-rating scale of wellbeing, activity and mood).

These results witness to the usefulness of 2 or 3 isometric training sessions a week to reduce physiological reactions to static loading 7.4–16.0 % and thus to optimize the flight instructor's efficiency.

Key words: flight-instructor, static tolerance, statoergometer test, physical training of pilots.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами сотрудников ИМБП:

Андрееву Елену Ромуальдовну

Евсеева Виктора Анатольевича

Зеленову Раису Георгиевну

Мысловскую Татьяну Семеновну

Овчинникова Валерия Васильевича

Сахарову Анну Борисовну

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!