ABИAKOCMИЧЕСКАЯ 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, член-корреспондент РАН
Виноградова О.Л., д.б.н., профессор — заместитель главного редактора
Дьяченко А.И., д.т.н., профессор
Ерофеева Л.М., д.б.н., профессор
Иванов И.В., д.м.н., профессор
Ильин Е.А., д.м.н., профессор

Котов О.Б., 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
Микаі Сh., М.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
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)

2020 T. 54 № 2

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1967 ГОДУ

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

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

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

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

- © Государственный научный центр РФ Институт медико-биологических проблем РАН, 2020
- © State Research Center RF Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2020

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 02.04.2020 Подписано в печать04.2020 Формат 60 × 84 1/8 Гарнитура Таhoma Печать офсетная Усл. печ. л. 12,32 Тираж 200 экз Заказ № ...

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

Содержание Contents

Обзоры Reviews

Поляков А.В., Ильин Е.А., Усов В.М., Дворников М.В., Кузнецова Т.Е., Косачев В.Е., Крючков Б.И. Инновационные технологии для медицинского обеспечения пострадавших в нештатных и аварийных ситуациях в условиях Арктики

Polyakov A. V., Ilyin E.A., Usov V.M., Dvornikov M. V., Kuznetsova T.E., Kosachev V.E., Kryuchkov B.I. Innovative medical care technologies for the damaged in off-nominal and emergency situations in the Arctic

Марченко Л.Ю., Сигалева Е.Э., Мацнев Э.И., **22** Аникеев Д.А. Современные представления о механизмах действия и возможностях клинического применения ингаляций ксенона в целях нейропротекции

22 Marchenko L.Yu., Sigaleva E.E., Matsnev E.I., Anikeev D.A. Current view of the action mechanisms and clinical use of xenon inhalations for the purposes of neutroprotection

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Кудрявцева Н.С., Сорокин А.Е. Сравнительная оценка надежности и расчет затрат при проектировании систем жизнеобеспечения для долговременных межпланетных полетов

Kudryavtseva N.S., Sorokin A.E. Comparative reliability assessment and costing of life support systems for extended interplanetary missions

Голикова Е.А., Андрианова И.В., Буравкова Л.Б. **38** Методические подходы для изучения эффектов моделируемой микрогравитации при сокультивировании гемопоэтических предшественников и мезенхимальных стромальных клеток

38 Golikova E.A., Andrianova I.V., Buravkova L.B. Approaches to studying the effects of simulated microgravity in co-culture of hemopoietic progenitors and mesenchymal stromal cells

Лебедева С.А., Швед Д.М., Федяй С.О. **45** Изучение психофизиологического состояния человека в условиях воздействия моделируемой микрогравитации методом анализа акустических характеристик речи

5 Lebedeva S.A., Shved D.M., Fedyai S.O. Investigation of human psychophysiological state in the conditions simulating the microgravity effects using the acoustic method of speech analysis

Бубеев Ю.А., Усов В.М., Сергеев С.Ф., **52** Крючков Б.И., Михайлюк М.В. Взаимодействие человека с виртуальной моделью лунного мобильного робота в изоляционных экспериментах

52 Bubeev Yu.A., Usov V.M., Sergeev S.F., Kryuchkov B.I., Mikhailyuk M.V. Human interaction with virtual model of a lunar mobile robot in isolation experiments

Артамонов А.А., Орлов Д.О., Пучкова А.А., **60** Шпаков А.В., Воронов А.В. Вертикальное вывешивание как элемент виртуальной реальности при выполнении локомоций человека

60 Artamonov A.A., Orlov D.O., Puchkova A.A., Shpakov A.V., Voronov A.V. Vertical suspension as a virtual reality component during human locomotion

Шишов А.А., Богомолов А.В. Физиологическое **65** обоснование адекватного выхода из аварийной ситуации в высотном полете

65 Shishov A.A., Bogomolov A.V. Physiological substantiation of adequate emergency escape

Моисеев Ю.Б. Некоторые особенности **72** реакций позвоночного столба человека на ударное воздействие

Moiseev Yu.B. Some features of the human spinal column reaction to applied impact

Шибанов В.Ю., Моисеев Ю.Б., Наумов В.А., **77** Рыженков С.П. Использование антропоморфного манекена типа Hybrid-III при оценке ударного воздействия на голову

77 Shibanov V.Yu., Moiseev Yu.B., Naumov V.A., Ryzhenkov S.P. Use of the Hybrid-III anthropomorphic phantom in testing the impact action on the head

Яснецов Вик.В., Иванов Ю.В., Карсанова С.К., Яснецов В.В. Действие комбинаций мелатонина с производными 3-гидроксипиридина на нейроны теменной ассоциативной коры большого мозга у животных

Yasnetsov Vik.V., Ivanov Yu.V., Karsanova S.K., Yasnetsov V.V. Effect of melatonin combined with 3-hydroxypyridine derivatives on neurons of the parietal association cortex in the brain of animals

Борзых А.А., Кузьмин И.В., Кирюхина О.О., **89** Селиванова Е.К., Швецова А.А., Лазаренко В.С., Лос Аркос Уварова С., Нестеренко А.М., Тарасова О.С. Произвольная беговая тренировка самок крыс во время беременности: характеристика экспериментальной модели

89 Borzykh A.A., Kuzmin I.V., Kiryukhina O.O., Selivanova E.K., Shvetsova A.A., Lazarenko V.S., Los-Arkos Uvarova S., Nesterenko A.M., Tarasova O.S. Voluntary running training of female rats during gestation: characteristics of an experimental model

Белишева Н.К., Цетлин В.В., Мартынова А.А., Соловьевская Н.Л., Завадская Т.С., Пряничников С.В., Мегорский В.В. Вода как индикатор космофизических воздействий на организм человека в условиях архипелага Шпицберген

96 Belisheva N.K., Tsetlin V.V., Martynova A.A., Solovievskaya N.L., Zavadskaya T.S., Pryanichnikov S.S., Megorsky V.V. Water as an indicator of cosmic physical effects on the human organism in the conditions of the Svalbard archipelago

Некролог 105 Necrology

ОБЗОРЫ

УДК 614.88; 616.2:613.68; 323; 331.483; 364.444; 004.896; 629.78:57.08

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТРАДАВШИХ В НЕШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Поляков А.В.¹, Ильин Е.А.¹, Усов В.М.^{1, 2}, Дворников М.В.², Кузнецова Т.Е.³, Косачев В.Е.⁴, Крючков Б.И.⁵

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

E-mail: apolyakov@imbp.ru

Рассмотрена эффективность комплексного применения инновационных технологий как в интересах расширения объема помощи пострадавшим на месте нештатных и аварийных ситуаций в экстремальных условиях Арктики, так и для подготовки к медицинской эвакуации пострадавших. Отмечена возможность использования при спасании жизни в условиях переохлаждения передовых разработок и медицинских технологий, ранее предложенных ГНЦ РФ – ИМБП РАН для спасения подводников. В числе инновационных решений для всех этапов поисково-спасательных и эвакуационных мероприятий дополнительно к инновационным медицинским технологиям предложено применение современных комплексов робототехники, в частности, беспилотных аппаратов различного базирования, эффективных средств оповещения о происшествии, точного определения места нахождения пострадавших, средств связи и мониторинга тактической обстановки при перемещениях спасательных команд, роботизированных комплексов поддержки жизненно важных функций и выполнения реанимационных мероприятий на месте происшествия и на этапах эвакуации и др.

Ключевые слова: критические состояния организма, переохлаждение, средства защиты организма от холода, оказание неотложной помощи при холодовой травме, беспилотные аппараты, роботизированные биотехнические комплексы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 5–21.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-5-21

В последние годы все большее внимание российских государственных деятелей, промышленников, бизнесменов и ученых уделяется Арктической зоне России (АЗР). И это естественно, так как эта зона

становится нашей стратегической ресурсной базой не только на ближайшее, но и на отдаленное будущее.

Совет безопасности РФ в декабре 2019 г. одобрил основы государственной политики России в Арктике на период до 2035 г. и рекомендовал в течение 2020 г. завершить разработку российской стратегии развития Арктики.

Арктическая зона занимает 30 % территории России. Это Мурманская и Сахалинская области, Чукотский автономный округ, Республика Саха (Якутия), север Архангельской области, некоторые районы Тувы и Тюменской области, северная часть Красноярского края, острова Северного Ледовитого океана и его морей, а также острова Берингова и Охотского морей. Арктическую зону РФ часто называют Крайним Севером. Все эти территории находятся в условиях особо холодного климата.

В Арктике находятся богатые запасы нефти, газа, коксующегося угля, алмазов, руд цветных и редкоземельных металлов, а Северный Ледовитый океан богат разнообразными биоресурсами. В этой связи одной из основных задач стратегии развития Арктики является расширение производственной деятельности и инфраструктуры в суровых природно-климатических условиях региона.

Из материалов Международного Арктического форума, проведенного в Санкт-Петербурге в 2018 г., следует, что в ближайшие годы в Арктике планируется строительство железной дороги с выходом на морские порты, развитие перевозок пассажиров и грузов самолетами местных авиалиний, обустройство новых газовых месторождений в труднодоступных и изолированных территориях, строительство

²Научно-исследовательский испытательный центр авиакосмической медицины и военной эргономики Центрального научно-исследовательского института ВВС Минобороны России, Москва

 $^{^3}$ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва

⁴Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова

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

Северного горно-обогатительного комбината по добыче и переработке свинцово-цинковых руд, расширение работ на арктическом шельфе.

Наряду с развитием такого транспортного коридора, как Северный морской путь, который связывает страны Европы со странами Юго-Восточной Азии, в последние годы широко обсуждается идея спрямленных авиарейсов из Азии в Северную Америку через Северный Ледовитый океан с использованием воздушного пространства России. Эта идея получила одобрение таких международных организаций, как ICAD и IATA.

Учитывая уникальность и многообразие природной среды арктической зоны, в последние годы резко увеличилось число самостоятельных и организованных туристических поездок на Беломорье, в национальный заповедник «Русская Арктика» — особо охраняемую природную территорию на архипелаге Земля Франца-Иосифа с прилежащей акваторией, и на Ямал. Арктический туризм — одна из перспективных сфер деятельности в этом регионе.

Следует также иметь в виду, что в 180 км южнее Архангельска – неофициальной столицы Российской Арктики – расположен космодром Плесецк, где, наряду с запусками автоматических космических аппаратов, ведутся работы по обеспечению в будущем запусков космических аппаратов с человеком на борту.

Создание промышленной инфраструктуры, комплексов оборонного назначения, интенсификация геолого-разведывательных работ и развитие экологического туризма в Арктике неизбежно потребуют создания разветвленной сети транспортных коммуникаций и увеличения объемов межрегиональных и внутренних перевозок. Учитывая неблагоприятные климатические условия АЗР и нахождение людей в ряде случаев в удаленных и труднодоступных местах, всегда имеется вероятность возникновения нештатных ситуаций, т.е. событий, которые могут повлечь за собой отрицательное воздействие на человека, технику и окружающую среду. Нештатные ситуации могут приводить к авариям, техногенным происшествиям, создающим угрозу здоровья и жизни людей и приводящим к разрушению техники и нанесению ущерба окружающей среде. Нештатные и аварийные ситуации, особенно вдали от крупных населенных пунктов АЗР и в холодное время года, могут потребовать оказания срочной технической и медицинской помощи. Это касается не только возможных ситуаций с наземным, водным и местным воздушным транспортом. Следует также иметь в виду и вероятность вынужденной досрочной посадки в Арктике спускаемого модуля транспортного пилотируемого корабля (СМ ТПК) при запуске пилотируемого космического аппарата (ПКА) на определенные орбиты.

Следует быть также готовым к нештатным ситуациям и авариям в случаях, когда полеты из

Юго-Восточной Азии в Северную Америку будут осуществляться через Северный Ледовитый океан с пролетом над АЗР. Последствия нештатных и аварийных ситуаций для жизни и здоровья экипажей наземных, воздушных и морских транспортных средств в условиях Арктики могут быть весьма драматичными, если им не будет своевременно оказана техническая и медицинская помощь. Это означает, что необходима интенсификация разработки и применения новых наиболее эффективных средств поиска, спасания и оказания медицинской помощи людям, оказавшимся в чрезвычайной ситуации в экстремальных условиях Арктики.

С точки зрения условий выживания АЗР характеризуется длительным периодом времени года с низкими температурами — до -50—55 °C в сочетании с сильными ветрами (20—25 м/с) и снегопадами, наличием медленно перемещающихся ледяных полей с торосами высотой до 3—4 м. Спецификой северных районов является также большая продолжительность полярной ночи (на широте 70° до 70 сут) и соответственно полярного дня летом. Если иметь в виду травмоопасность для экипажа при вынужденной посадке самолетов или СМ ТПК следует особо выделить высокоствольные таежные массивы и горы с их крутыми склонами, ущельями и ледниками [1—3].

Для Арктики характерны существенные колебания ряда климатических факторов [4]. Там довольно часто проходят циклоны с выраженными атмосферными фронтами. Часто и резко меняются скорость ветра, температура воздуха (изменения температуры воздуха на 10–20 °C и более за 6–12 ч) и относительная влажность на 20–40 % и более в сутки.

Особо опасны сильные грозы, ливни, шквалы, метели, бураны, изменения количества кислорода в воздухе в течение 12 ч, значительные колебания электрического поля в атмосфере. Довольно часто возникают электромагнитные возмущения и магнитные бури. Неблагоприятные климатические условия в Арктике существенно затрудняют поиск, спасание и оказание медицинской помощи пострадавшим в нештатных и аварийных ситуациях.

Современная высокотехнологичная медицина обладает широкими возможностями для оказания помощи при развитии критических состояний организма, когда выполняется ряд условий: эффективная система связи (оповещения), наличие достаточного резерва времени для сохранения/восстановления жизнеспособности критически важных органов и тканей, своевременная и надежная работа транспортной системы доставки пострадавшего (пациента) и доступная для выполнения реанимационных мероприятий медицинская аппаратура. Очевидно, что такие условия легче всего обеспечить на урбанизированной территории с развитым санитарным транспортом для своевременного оказания

медицинской помощи и госпитализации пострадавшего (пациента) в специализированный многопрофильный клинический стационар.

В последние годы интенсивно проводятся исследования и ведутся разработки инновационных подходов к внедрению новейших достижений медицины критических состояний на удаленных территориях и в полевых условиях, в том числе в жизнеугрожающих ситуациях экстремальной среды. В первую очередь это относится к военной медицине, медицине катастроф и медицинским структурам МЧС. Такие подходы сегодня востребованы и в приложениях к авиакосмической медицине, поскольку потенциально возможны нештатные ситуации и аварии при досрочном (вынужденном) завершении пилотируемого полета. Такие нештатные ситуации и аварии с космическими, авиационными, наземными и морскими транспортными средствами должны рассматриваться с позиций прогноза рисков для жизни и здоровья пострадавших и оказания неотложной медицинской помощи в максимально возможном объеме на месте происшествия, в том числе в неблагоприятных климатических условиях. В настоящее время состав рисков в сложных климатогеографических условиях хорошо известен. Применительно к таким условиям предложен ряд способов противодействия неблагоприятному воздействию на организм человека экстремальных факторов. Тем не менее конкретные особенности организации медицинского обеспечения поисково-спасательных работ требуют дополнительного изучения, особенно в части понимания лимитирующих условий для выживания человека в Арктике в случаях нештатных ситуаций и аварии. В интересах совершенствования системы медицинского обеспечения должны быть изучены вопросы, насколько быстро и какие могут развиться критические состояния и какое оснащение средствами защиты обеспечит способность человеку противостоять угрозам жизни и здоровью в период от начала нештатной ситуации или аварии и до прибытия спасательных команд. Чтобы существенно улучшить условия выживания пострадавших в условиях Арктики, необходимо проанализировать имеющийся опыт из смежных областей медицины, таких, как военная медицина, медицина катастроф и медицина критических состояний. Несомненно, также заслуживает внимания изучение потенциала инноваций, накопленных авиакосмической и морской медициной применительно к обеспечению деятельности таких профессий, как подводники, летчики морской авиации и др. Не вызывает сомнения и необходимость использовать при организации проведения масштабных мероприятий по медицинскому обеспечению и медицинской помощи в ходе операций поиска и спасания знаний и технологий комплексного применения биотехнических и робототехнических систем.

В данной работе рассмотрены некоторые возможные варианты комплексного применения инновационных технологий на месте происшествия для расширения объема медицинской помощи и подготовки пострадавших к эвакуации.

Тактические варианты использования авиационных подразделений системы поиска и спасания с включением в их состав средств беспилотной авиации

При разработке тактических схем спасания и оказания экстренной медицинской помощи экипажам различных транспортных средств (что можно прогнозировать и в случае оказания помощи космическому экипажу при вынужденной посадке в районах с высоким риском холодовой травмы) необходимо принимать во внимание основные направления применения авиационных подразделений, которые в северных районах обеспечивают наибольшую мобильность и оперативность в чрезвычайных ситуациях, и имеющиеся ресурсы развернутых структур системы МЧС [5–8].

Известно, что зачастую бывает крайне сложно осуществить исследование северных территорий пилотируемой авиацией и крайне опасно проводить изучение места происшествия «человеческими ресурсами» без применения специальных средств поиска и обнаружения потерпевших в нештатной ситуации или аварии. Необходимость сохранения жизни самих спасателей в сложных условиях малоизученной обстановки требует поиска альтернативных способов и средств поиска и обнаружения пострадавших [9, 10].

С этих позиций имеются основания к более широкому применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в составе сил авиационного поиска и спасания (или в другой терминологии «беспилотников», хотя часто так называют и наземные мобильные роботы). БПЛА уже сегодня широко применяют в решении проблем освоения и развития северных регионов России, а также в интересах МЧС [11]. Следовательно, совершенно определенно можно говорить о том, что авиационные комплексы с БПЛА в их составе одно из наиболее перспективных направлений развития авиационного транспорта для поиска и эвакуации пострадавших в АЗР.

Это положение основано на том, что, согласно публикации [12], БПЛА способны решать следующий широкий круг задач:

- ведение в реальном масштабе времени всех возможных, в зависимости от имеющейся на борту целевой нагрузки, видов разведки для получения требуемой информации;
- корректирование действий, а также сил и средств, привлекаемых для проведения поисково-спасательной операции;

- выдача целеуказания и оценка результатов для руководителей поисково-спасательной операцией;
- ретрансляция информации по назначению с использованием БПЛА в качестве ретранслятора в информационно-связных системах различного назначения;
- мониторинг объектов в зоне поиска для обеспечения безопасности мероприятий по поиску и спасанию;
- оперативный круглосуточный мониторинг высокорисковых технологических объектов и транспортной инфраструктуры, расположенных в зоне поиска, проведение инспекции объектов.

При этом особо выделяются следующие преимущества применения БПЛА:

- возможность использования аэродромов или наземных площадок без специальной подготовки инфраструктуры и многократность использования БПЛА;
- более низкая стоимость разработки, производства и эксплуатации в сравнении с пилотируемыми летательными аппаратами, исключение потерь личного состава;
- использование в качестве целевой нагрузки радиоэлектронной и специальной аппаратуры для решения широкого круга разведывательных, навигационных задач и задач аварийного оповещения;
- возможность использования для взлета и посадки ограниченных по размеру площадок (для мини- и микроБПЛА и БПЛА вертолетного типа);
- дополнительно для БПЛА вертолетного типа малое время подготовки к полету, высокая маневренность, возможность полета в режиме зависания, малый уровень помех от силовых установок.

Как иллюстрация этих положений в работе [9] приводятся данные, что в подразделениях МЧС РФ уже сегодня успешно эксплуатируются БПЛА различной конструкции, грузоподъемности, полезной нагрузки, а также различного предназначения.

Практически важно, что БПЛА, применяемые в МЧС, имеют спутниковую навигацию GPS/ГЛОНАСС. В полезную нагрузку входят фото- и видеокамеры, тепловизоры, различные датчики и анализаторы. Это позволяет комплексировать различные виды БА при проведении поисково-спасательных мероприятий и объединять БА в группы для совместного применения в слабоструктурированной внешней среде.

В качестве одной из ключевых задач специалисты в области развития беспилотной авиации в нашей стране называют необходимость ускоренно и системно развивать применение беспилотников в единой системе авиационно-космического поиска и спасания (ЕС АКПС). Практический опыт уже показал безопасность и экономический эффект такого применения. Использование БПЛА дает новые возможности поиска в различных условиях, в том числе в Северных районах России, в темное время суток,

в условиях плохой видимости (туман, задымление), когда риск потерять пилота высок. Беспилотник решает эту задачу, исключая при этом такой риск и обеспечивая получение высокого качества данных [13].

При выполнении полетов в неконтролируемом воздушном пространстве при отсутствии на постоянной основе диспетчерского обслуживания одним из перспективных подходов является реализация возможности пилотируемым и беспилотным воздушным судам «автономно видеть» друг друга, автоматически оповещать о своем присутствии и использовать алгоритмы уклонения при опасном сближении. В качестве базовой технологии для реализации указанных задач экспертами ИКАО и мировым беспилотным сообществом рассматривается технология автоматического зависимого наблюдения радиовещательного типа АЗН-В [14]. В окончательном виде данная технология еще не принята к масштабной реализации, поскольку ввиду больших экономических затрат на подобные проекты идет поиск рационального сочетания использования сети наземных станций и/или данной технологии в различных районах базирования и применения авиационных средств [15, 16].

Перспективные решения по применению групп беспилотных аппаратов для поиска и спасания пострадавших и организации неотложных мероприятий на месте происшествия

В области конструирования мобильных интеллектуальных роботов все больший интерес исследователей отмечается к вопросам применения групп беспилотных аппаратов (БА) наземного, воздушного, надводного и подводного базирования, что отражает те сферы применения, где функционал этих изделий как разведчиков и спасателей наиболее востребован. В первую очередь рассматривается применение БА воздушного и наземного базирования, о чем уже упоминалось.

Как в нашей стране, так и за рубежом активно разрабатываются роботизированные комплексы для проведения поисково-спасательных операций на море по поиску людей, оказавшихся за бортом корабля, и подводников, а также их снабжения спасательными жилетами, средствами оказания первой доврачебной помощи [17–22].

В поле зрения специалистов находятся также и конструкции типа «антропоморфный манипуляционный робот». По грантам Фонда перспективных исследований проводится работа по созданию робота-манипулятора, способного выполнять комплекс аварийно-спасательных работ с использованием стандартных монтажных инструментов, а также обладающего функциями поиска и извлечения пострадавших при разборке завалов в ходе аварийно-спасательных работ [23].

Сегодня наибольшие перспективы применения роботов и робототехнических комплексов в экстремальной обстановке специалисты в области робототехники связывают с комплексированием возможностей разнородных БА в составе группы, состоящей из множества элементов (в принятой терминологии – рой дронов). В состав роя дронов могут входить роботы, которые способны работать в разных средах: БПЛА (англ.: Unmanned Aerial Vehicle – UAVs), наземные роботы (англ.: Unmanned Ground Vehicle – UGVs), подводные дроны (англ.: Underwater Drones или Unmanned Underwater Vehicle – UUV).

Такой подход способствует достижению «синергетического эффекта» посредством дополнения функционала одного типа БА возможностями другого типа, а также улучшения ситуационной осведомленности всех специалистов, которые участвуют в подготовке и принятии решения при поисково-спасательных работах, за счет коммуникации роботов и обмена данными, полученными с помощью бортовых систем от роя дронов.

Для спасательных операций на протяженных труднопроходимых маршрутах в первую очередь актуален вопрос о совместном применении БА воздушного и наземного базирования [24].

БА (UGVs) наземного базирования активно разрабатываются как в нашей стране, так и за рубежом, в том числе для применения в составе группы [25, 26]. Существуют российские планы создания группы роботов в составе БПЛА и БА наземных транспортных средств для проведения спасательных работ в условиях Арктики [27].

Согласно этим планам, отечественный разработчик БА (ЦНИИ РТК, СПб) на основании опыта создания телеуправляемых мобильных роботов - ликвидаторов последствий аварий и техногенных катастроф разрабатывает систему поиска и спасания пострадавших в Арктике. Проект предполагает создание системы управления дронами, позволяющей объединить для действия в одной группе разнородных роботов – БПЛА и наземные мобильные комплексы. Решение этой задачи позволит добиться кумулятивного эффекта: группа небольших беспилотников должна определять координаты терпящих бедствие, вести навигационную разведку маршрута и в режиме реального времени создавать электронную карту местности, а наземный отряд – роботизированные платформы амфибийного типа – предназначаются для эвакуационных работ. Также имеются отечественные разработки, направленные на создание алгоритмов применения групп роботов для спасания на море [28–31].

Использование геоинформационных технологий при проведении поисково-спасательных операций в сложной оперативно-тактической обстановке

Задачи поисково-спасательных работ в условиях Арктики стимулировали применение ряда

взаимосвязанных инновационных технологий, знание особенностей которых помогает специалистам разных профессий более эффективно решать стоящие перед ними задачи. Профессия врача, задействованного в ликвидации последствий нештатных и аварийных ситуаций, в этом смысле не является исключением. Владение методами доступа к актуальной информации, представленной на многослойных электронных картах (ЭК) и закодированной с помощью геоинформационных технологий (ГИТ), может способствовать принятию правильных решений по мобилизации сил и средств медицинской службы для ликвидации последствий серьезных происшествий.

Как известно, ГИТ — это информационные технологии обработки географически организованной информации. Основной особенностью геоинформационных систем (ГИС), определяющих их преимущества в сравнении с другими применяемыми в практической медицине автоматизированными информационными системами (АИС), является наличие геоинформационной основы, т.е. ЭК, дающих необходимую информацию о земной поверхности, что особенно важно при выполнении мероприятий медицинской службы на протяженных и малонаселенных территориях [32].

При этом ЭК должны обеспечивать:

- точную привязку, систематизацию, отбор и интеграцию всей поступающей и хранимой информации (единое адресное пространство);
- комплексность и наглядность информации для принятия решений;
- возможность динамического моделирования процессов и явлений;
- возможность автоматизированного решения задач, связанных с анализом особенностей территории;
- возможность оперативного анализа ситуации в экстренных случаях.

Отметим также, что применение ГИТ является одним из новых направлений разработки перспективных технологий для улучшения деятельности военно-медицинской службы в управлении медицинским обеспечением [33].

Существенно то обстоятельство, что с помощью этого информационного инструмента врачи, привлекаемые к поиску и спасанию, могут в априорном режиме получить все необходимые данные о доступных в зависимости от локализации происшествия ресурсах, включая клинические учреждения, стационарные места складирования имущества и базирования санитарного транспорта, а также рассчитать время транспортировки к месту происшествия с учетом доступности к этому месту, чтобы в последующем в оперативном режиме вносить поправки и уточнения с учетом быстро меняющейся картины в ходе поисковой операции.

Здесь следует еще раз подчеркнуть весомую роль выполняемого на постоянной основе с помощью БПЛА мониторинга местности для обновления ЭК и ГИС-данных.

Несвоевременная корректировка ЭК может значительно увеличить время прибытия в зону происшествия подразделений спасателей и не позволить правильно рассчитать силы и средства, чтобы более слаженно работать при ликвидации последствий нештатной или аварийной ситуации, выполнить необходимые медицинские мероприятия на месте происшествия и правильно построить схему эвакуации.

Оперативная коррекция карт местности, обозначение объектов потенциальных опасностей для здоровья и жизни человека, а также «карта погоды» — все это имеет непосредственное отношение к экстремальной и экологической медицине, так как позволяют дать более точный прогноз риска тех или иных повреждений и травм у лиц, включая и такие чрезвычайные ситуации, как стихийные бедствия и неблагоприятные экологические условия для выживания при техногенных авариях (взрывы, пожары, выбросы химических агентов и др.).

Основой принятия решений в сложной тактической обстановке в этом случае являются пространственно координированные данные, оперативное получение которых возможно при использовании ГИС. Этот инструмент предназначается для сбора, хранения и представления больших массивов пространственно упорядоченных, топографических и других данных, в том числе с учетом информации, получаемой с помощью глобальных систем спутниковой навигации (ГЛОНАСС) в интересах поддержки принятия решений по планированию тактических операций, в том числе для проведения поисковых работ и эвакуационных мероприятий [33].

Доставка спасательных средств и медицинского оборудования для экстренных мероприятий медицинской помощи на месте происшествия

Регионы Севера являются природной экстремальной зоной. Суровость климата высоких широт не может не отразиться на функциональном состоянии спасателей и пострадавших в нештатных и аварийных ситуациях, их работоспособности и здоровье. В условиях Крайнего Севера организм человека оказывается в необычной среде [34, 35], и деятельность в условиях воздействия на организм неблагоприятных климатических факторов может вызвать у человека дезадаптационные расстройства или пограничные состояния организма, а также способствовать снижению работоспособности и развитию заболеваний [36—40].

В условиях Арктики человек прежде всего подвергается воздействию холода. Холод является доминирующим фактором, который

влияет на теплообмен и работоспособность человека. Выявлено, что отрицательные температуры и ветер приводят к утяжелению труда и снижению работоспособности [41].

Холодовой стресс является значимым фактором риска заболеваемости. Работа в условиях Крайнего Севера приводит к более частому возникновению функциональных и патологических сдвигов, особенно это касается тех систем и органов, резервы которых наиболее полно задействованы и в которых наблюдаются выраженные адаптивные перестройки. Показано, что коэффициент полезного действия физической работы на открытом воздухе в условиях Крайнего Севера примерно на 15–20 % ниже, чем в средних широтах, что свидетельствует о более высокой физиологической стоимости трудовой нагрузки [36].

Проявления отрицательного влияния холода на различные системы организма объединяют в понятие «холод-ассоциированные» симптомы, включающие в себя вазоконстрикцию, боли, нарушения чувствительности и изменение цвета открытых частей тела.

Сужение сосудов на периферии усиливает центральное кровообращение, провоцирует диурез и повышение артериального давления. Охлаждение тканей повышает уровень гематокрита, вязкость и реологическое сопротивление крови. Температура в суставах уменьшается быстрее, чем в работающих мышцах. Переохлажденные суставы теряют подвижность из-за повышения вязкости синовиальной жидкости [36].

В последние годы исследователи обратили внимание на такой фактор, как низкая влажность воздуха в Заполярье в морозные дни, и связывают с ним такие явления, как повышенная «жажда у северян» и сниженный коэффициент использования кислорода в легких [42].

Чрезмерная сухость воздуха при отрицательных температурах является причиной не только усиления экстраренальных влагопотерь, но и формирования гипоксии у северян, что требует увлажнения воздуха в помещениях и разработки новых средств индивидуальной защиты органов дыхания для работы на морозе [42].

Типичными сдвигами при охлаждении тела являются падение температуры и теплосодержания покровных тканей тела, что может приводить к нарушениям в них обменно-энергетических процессов. В охлажденных областях тела наступают расстройства кровообращения (спазм артериол и артерий, ишемия тканей, стаз, нарушение проницаемости сосудов).

Таким образом, одним из ведущих факторов риска в Арктике может быть переохлаждение тканей тела, что требует обязательного использования эффективных средств теплозащиты при нахождении

на открытом воздухе (одежда, головные уборы, перчатки, обувь) и соответствующего микроклимата в зашитных помешениях/сооружениях.

На основе знаний этиологии и патогенеза холодовой травмы ведутся многочисленные разработки по составу защитного снаряжения, формируются предложения по снабжению этим снаряжением автономных групп, оказавшихся во временной изоляции после происшествий на территориях Крайнего Севера, а также по профессиональной подготовке лиц, работающих на этих территориях, к активным целесообразным действиям и адекватному поведению в сложной обстановке выживания в экстремальной среде, в том числе в отношении создания временного убежища из подручных средств, правил употребления воды, пищи и пользования средствами обогрева и сохранения тепла. Например, для профессии космонавтов предусмотрены специальные виды подготовки к выживанию в различных климатогеографических зонах, включающие тренировки в натурных условиях горно-лесистой местности и на воде для практической отработки действий по выживанию [43]. Существуют также информационные web-сайты, предназначенные как для специалистов-спасателей, так и для туристов-любителей, посвященные широкому кругу проблем спасания пострадавших и выживания в экстремальной среде [44].

Из практического опыта следует, что при оказании экстренной помощи пострадавшим на месте происшествия, особенно в экстремальных условиях внешней среды, определяющим является фактор времени: именно от своевременности и полноты проводимых мероприятий зависит тяжесть поражений и их исход при действии повреждающих факторов. Именно в этом аспекте была рассмотрена первая составляющая концепции организации помощи пострадавшим в нештатных или аварийных ситуациях путем сокращения времени спасательной операции. Это интенсификация фазы поиска для скорейшего определения местоположения пострадавших и установление с ними устойчивой связи с целью мониторинга текущей ситуации, в том числе для своевременного выявления развития жизнеугрожающей ситуации. Это, в свою очередь, обусловило интерес к расширению сферы использования БА.

На оказание своевременной помощи пострадавшим в отдаленных и труднодоступных районах ориентирована и вторая часть концепции организации медицинской помощи пострадавшим, суть которой – планирование и реализация мероприятий, направленных на улучшение условий: а) выживания пострадавших путем доставки индивидуальных комплектов защитных средств, воды, продуктов питания, пополнение носимого аварийного запаса (НАЗ), аптечки с набором средств для первой помощи; б) оказания первой медицинской помощи и упреждающей доставки медико-технического оснащения для прибывающей спасательной бригады и врачей, на которых планируется возложить проведение реанимационных мероприятий при переохлаждении и подготовку пострадавших к медицинской эвакуации.

Решение первой задачи, как показано выше, достигается десантированием грузов авиационными средствами на место происшествия. Также изучаются возможности использования БПЛА для их срочной доставки (с учетом прогноза ожидаемого времени автономного выживания в условиях гипотермии до прибытия спасательных команд), поскольку имеются преимущества такого способа в более оперативном выполнении операций доставки грузов.

В рамках второй задачи медицинские специалисты должны предусмотреть объем первой помощи пострадавшим. В экстремальных условиях, вероятно, она будет необходима при таких угрожающих жизни поражениях, как травмы, кровопотери, отравления (угарным газом при возгорании окружающего леса или попадании агрессивных жидкостей), остановка дыхания и кровообращения, обморожения и пр.

Эффективность медицинских мероприятий по оказанию помощи при развитии холодовой травмы, как и при других повреждениях, будет зависеть от времени их выполнения. При этом следует учесть, что даже в условиях глубокой гипотермии ткани могут сохранять жизнеспособность в течение длительного времени. Имеются многочисленные данные, что повреждение тканей при отморожениях наступает вследствие растянутых по времени нарушений кровоснабжения и иннервации. Поэтому рациональные и своевременные лечебные мероприятия способны предупредить развитие необратимых изменений или существенно уменьшить их распространенность. В итоге улучшатся результаты лечения и качество жизни пострадавших.

Помимо перечисленных мероприятий неотложной помощи, при холодовой травме имеются еще как минимум две критически важные научно-практические задачи в плане оперативного принятия врачебных решений на применение специальной аппаратуры, позволяющей:

- на базе инструментальных комплексов для обогрева организма выводить человека из критического состояния переохлаждения с учетом сопутствующих рисков повторных угроз нарушения функций организма;
- на основе современных достижений телемедицины выполнять мониторинг состояния человека, когда прогнозируется и реализуется негативный сценарий развития переохлаждения организма или когда есть риски вторичных осложнений при выведении из состояния переохлаждения.

Предлагаемые медико-технические решения по оказанию помощи пострадавшим в значительной

степени основаны на инновационных разработках и технологиях ГНЦ РФ — ИМБП РАН, опубликованных в ряде научных статей и в сводном виде представленных на официальном web-сайте ГНЦ РФ — ИМБП РАН [45].

В число прототипов рассматриваемых и рекомендуемых для применения в экстремальных условиях северных районов России в нештатных и аварийных ситуациях входят следующие, защищенные патентами изделия, ранее предложенные для спасания подводников при состояниях переохлаждения [45]:

1. Аппарат кислородно-гелиевой терапии (КГТ) позволяет обеспечить дыхание подогретой кислородно-гелиевой газовой смесью (КГС) для выведения пострадавших из состояния гипотермии, в том числе в полевых условиях. В зависимости от модификации аппарата лечение может проводиться либо автоматическим смешиванием кислорода и гелия по заданному процентному содержанию, либо готовыми КГС. Аппарат КГТ способствует улучшению показателей функционального состояния организма, улучшению показателей вентиляции и перфузии легких, повышению анаэробно-аэробных возможностей организма. По современным представлениям обогрев ядра тела дыханием подогретой газовой смесью является одним из наиболее физиологически мотивированных способов реанимации.

Терапевтический эффект КГС основан на особых свойствах гелия, который обладает:

- чрезвычайно высокой проникающей способностью (плотность почти в 7 раз меньшая, чем у азота основного газа-разбавителя кислорода в воздухе);
- высокой теплоемкостью (в 5,8 раза выше, чем у азота);
- низкой растворимостью в жирах и воде (в 4,5 раза меньше, чем у азота);
- не вступает в химическую реакцию с организмом;
- обеспечивает увеличение объемной скорости движения газовой смеси и нормализует газовый состав крови и кислотно-щелочное равновесие.

При КГТ происходит мощное тепловое и теплорефлекторное воздействие на организм.

2. Медицинский концентратор кислорода (МКК) предназначен для получения обогащенных кислородом газовых смесей (ОКГС) из сжатого атмосферного воздуха и их использования в аппаратах искусственной вентиляции легких и аппаратах ингаляционного наркоза при оказании реаниматологической помощи в полевых и экстремальных условиях. Реализованный метод адсорбции позволяет применять концентратор для обеспечения ОКГС непосредственно в местах их потребления. Область применения: экстремальная медицина, медицина катастроф. Показания к применению МКК связаны с развивающимся при гипотермии кислородным

голоданием всех жизненно важных органов, в первую очередь головного мозга. С повреждением нервной ткани связаны не только сиюминутные риски для жизни человека, но и отдаленные последствия сохранности высшей нервной деятельности и психической активности без утраты социальной и трудовой дееспособности.

3. Термохимический генератор кислорода (ГКС) разработан для применения в качестве резервного источника получения кислорода в условиях космического пилотируемого полета при отказе основных источников его получения. На основе данной технологии созданы генераторы для получения кислорода в полевых или экстремальных условиях с целью наполнения им баллонов, используемых в портативных аппаратах искусственной вентиляции легких и наркозно-дыхательных аппаратах. Показания к применению те же, что и при использовании МКК.

Что касается проблем мониторинга состояния человека при риске развития грозных осложнений, то сегодня общепризнано, что при использовании биотехнических систем с биологической обратной связью достоверность медицинского диагноза и прогноза достигаются на качественно более высоком уровне. В этой связи актуальна разработка электронных датчиков для дистанционного измерения температуры тела и окружающего пространства как первичного звена сбора исходных данных. При этом необходимо учитывать, что в случае применения разной спецодежды, носильного белья, средств жизнеобеспечения летчика или космонавта окружающая тело человека искусственная среда может иметь разные защитные характеристики, также значимо могут различаться эффекты обогрева разных частей тела человека.

Особенности первичной реанимации пострадавших при переохлаждении организма на месте происшествия в условиях Арктики

Фактор экстремально низких температур является доминирующим при оценке рисков жизни и здоровью при любой нештатной ситуации или аварии в условиях северных районов России — на суше и особенно на море. Не исключается потенциальная возможность других видов поражений и травм [46—48]. В этой связи необходимо в кратчайшие сроки выполнить неотложные мероприятия медицинской помощи, направленные на устранение угрожающих жизни нарушений, и подготовить пострадавшего к эвакуации. Основными мероприятиями первой помощи будут:

- устранение действия травмирующего или поражающего фактора;
- проведение базовой сердечно-легочной реанимации (СЛР);
 - временная остановка наружного кровотечения;
- наложение асептической повязки на раны и пораженные участки кожи;

- наложение окклюзионной повязки при пневмотораксе;
 - обеспечение транспортной иммобилизации;
- создание безопасных условий ожидания квалифицированной помощи и контроль состояния пострадавшего.

Некоторые из указанных медицинских мероприятий можно выполнить только с дополнительным использованием специализированных мехатронных систем СЛР (из-за высоких физических нагрузок на человека, длительно оказывающего непрямой массаж) и биотехнических систем оперативного контроля состояния, прежде всего контроля витальных функций (пульс, дыхание, артериальное давление, температура тела).

Трудности и специфика выполнения медицинских мероприятий на месте происшествия в условиях Арктики связаны преимущественно с воздействием и последствиями действия холодового фактора [49, 50]. В этой связи первичные реанимационные мероприятия проводятся с учетом ряда особенностей, и эти особенности должны знать не только медицинские специалисты, но и спасатели:

- не следует диагностировать у пострадавшего с глубоким переохлаждением смерть, пока не осуществлено его согревание или пока все проводимые методы согревания оказались безуспешны;
- определение пульса должно занимать не менее 1 мин, желательно параллельно с электрокардиографическим мониторингом: ввиду угнетения механической активности сердца отсутствие периферического пульса не может служить очевидным фактом остановки кровообращения у пострадавшего с гипотермией;
- гипотермия сопровождается ригидностью грудной клетки и ухудшением сжимаемости сердца, что затрудняет проведение механических компрессий грудной клетки, это же является дополнительным аргументом широкого применения автоматизированных методов компрессии, включая роботизированные комплексы;
- необходимо увлажнять и подогревать до 40–46 °С вдыхаемую смесь (с повышенным содержанием кислорода);
- электрическая дефибрилляция при температуре тела ниже 30 °C бывает неэффективной;
- кардиостимуляция может повышать возбудимость миокарда и увеличивать риск фибрилляции желудочков;
- крайне осторожно выполнять интубацию трахеи, так как она может спровоцировать фибрилляцию желудочков;
- необходимо обеспечить венозный доступ (лучше через центральную вену) для внутривенного введения подогретых растворов, так как охлаждение тела сопровождается периферическим вазоспазмом, нарушающим всасывание при внутримышечных и подкожных инъекциях.

При анализе современных подходов к оказанию помощи пострадавшим от холодовой травмы, в том числе находящимся в стадии переохлаждения, большую ценность представляют наработки в области морской медицины, поскольку холодовой фактор является одним из значимых в жизнедеятельности специалистов Военно-морского флота, в частности, при погружениях водолазов, а также при морских инцидентах и нештатном приземлении летательных аппаратов палубной авиации.

Главное внимание самих терпящих бедствие, спасателей и медицинских специалистов должно быть сосредоточено на сохранении теплового состояния пострадавших в пределах физиологических реакций организма. Это достигается путем создания укрытий для защиты от холода. Делать это надо быстро, так как резервные возможности организма в сохранении теплового состояния на допустимом уровне ограниченны. Потенциальные возможности технических средств защиты от холода в условиях Севера, как показывает опыт подготовленных людей, достаточно большие. Сделанное даже из снега укрытие (иглу) позволяет создать вполне приемлемые условия для выживания и ожидания помощи. Очень важно уметь правильно оценивать свое тепловое состояние и вовремя применять меры по устранению признаков локального охлаждения. Следует обращать внимание на теплозащиту открытых участков лица, рук и нижних конечностей. Для защиты от холода на месте происшествия можно использовать подручные и специальные средства теплозащиты, которые, кстати, имеются на борту самолета или пилотируемого космического аппарата. Однако даже специальное теплозащитное снаряжение имеет существенные ограничения.

В медицине накоплен большой опыт оказания помощи пациентам с тяжелыми холодовыми травмами, а также опыт проведения терапевтической гипотермии под контролем теплового и функционального состояния пациентов. Это позволило достаточно хорошо проработать вопрос мониторинга теплового и функционального состояния организма человека в полевых условиях.

При оказании неотложной помощи в полевых условиях система мониторинга теплового и функционального состояния должна быть, как это ни парадоксально звучит, более информативной, что позволит прежде всего решить диагностическую задачу, т.е. определить степень гипотермии, а в последующем контролировать режим отогревания организма. Главная задача — обеспечить отогревание изнутри. Самым эффективным способом является респираторный режим нагревания, который позволяет нагревать кровь, находящуюся в малом круге кровообращения в легких. Это достигается применением горячих кислородно-гелиевых газовых смесей, формируемых специальным оборудованием.

При повышении температуры в легких повышается температура крови, которая доставляет необходимое тепло внутренним органам. Обогревать поверхностные ткани категорически запрещено, что, увы, очень часто применяется, нанося непоправимый вред пострадавшему. Пострадавшего нужно надежно теплоизолировать от повышенных температур помещения, в котором оказывается помощь. Кожные покровы должны быть надежно защищены от нагрева снаружи. Мониторинг кожной температуры — это контроль полноты теплозащиты пострадавшего от внешнего преждевременного обогрева.

Аппаратные средства для мониторирования теплового и функционального состояния пострадавшего должны включать датчики температуры. В настоящее время существует достаточно широкий выбор различных датчиков, в том числе термохронов, имеющих систему программирования режимов синхронной регистрации параметров различного числа датчиков, оснащенных системой бесконтактной передачи информации и ее вывода на монитор в режиме онлайн. Такие же датчики должны быть установлены в полостях тела для оценки внутренней температуры. Большими диагностическими возможностями обладает тимпанальная температура, измеренная в полости наружного слухового прохода. Такие термометры давно применяются в детской практике, но точность получаемых данных зависит от качества теплоизоляции датчика от внешней температуры.

Потенциальными возможностями высокой диагностической информативности обладают датчики измерения интегральной температуры глубоких участков тела, разработанные Годиком. Что касается контроля биоэлектрической активности миокарда, то традиционные средства регистрации ЭКГ полностью обеспечивают информационную поддержку бригады, проводящей реанимационные мероприятия.

Мониторирование параметров внешнего дыхания позволяет оценивать уровень теплопродукции организма. Датчики контроля респираторной функции организма целесообразно встраивать в аппаратуру для КГТ нагретыми смесями. В ней же можно установить высокочувствительные температурные датчики, а также термоанемометрические датчики измерения температуры вдыхаемого и выдыхаемого воздуха. В начальной стадии проведения реанимационных мероприятий этот датчик позволит измерить температуру выдыхаемого воздуха, которая наиболее точно отражает внутреннюю температуру тела, так как соответствует температуре крови в легких. В процессе обогревания этот показатель позволит контролировать динамику изменения температуры пострадавшего. Разница между показаниями температурных датчиков дыхательной смеси на вдохе и выдохе, а также контроль объема

поступающего газовой смеси при осуществлении респираторной поддержки пострадавшего позволят контролировать количество тепла подаваемого на обогрев, а также динамику нормализации теплового состояния организма.

Общие принципы реанимации в стадии декомпенсации базируются на проведении интенсивной комплексной врачебной помощи, в которой различают этиотропный, патогенетический и симптоматический компоненты [51].

Этиотропное лечение включает меры по прекращению действия охлаждающего фактора и согревание организма. Наибольший эффект дает согревание внутренних органов и тканей (через прямую кишку, желудок, легкие). Активное согревание тела прекращают при температуре гомеостатического ядра 33-34 °C во избежание развития гипертермического состояния. Последнее возможно из-за того, что у пострадавшего еще не восстановлена адекватная функция системы теплорегуляции организма. Это обстоятельство часто становится причиной осложнений. При наличии признаков выраженных степеней переохлаждения необходимо принимать меры по защите от быстрого прогревания наружных тканей. Пострадавшего надо теплоизолировать от внешних источников тепла. При резком повышении температуры покровных тканей, но при сохранении низкой температуры в глубоких тканях, кровообращение остается нарушенным, что создает риск развития некроза в покровных тканях.

Для предупреждения кризисных явлений необходимо учитывать следующие особенности согревания пострадавшего и выведения из глубокого переохлаждения:

- все манипуляции необходимо осуществлять под тщательным мониторированием, что позволяет вовремя обнаружить вторичное снижение температуры тела после начала согревания, феномен afterdrop, механизм которого состоит в том, что при согревании периферических участков тела снимается сосудистый спазм, в центральный кровоток из периферии поступает большой объем охлажденной крови, вследствие этого температура внутри тела пациента может парадоксально снижаться после начала согревания, при этом усиливаются физиологические нарушения, повышается риск развития аритмий и остановки сердца;
- скорость согревания не должна превышать 1 °C в час из-за риска развития критической артериальной гипотензии и остановки сердца, обусловленных действием поступающих в «центральный» кровоток эндотоксинов и холодных порций крови;
- активное согревание в случаях глубокого переохлаждения следует прекращать при температуре ядра тела 34 °C;
- при активном внешнем согревании на догоспитальном этапе создавать температурный градиент

между температурой ядра тела и температурой согревающего устройства не более 2–3 °C.

Патогенетическое лечение включает восстановление эффективного кровообращения и дыхания. При нарушении дыхания необходимо освободить дыхательные пути от слизи и запавшего языка и провести искусственную вентиляцию воздухом либо, что предпочтительнее, газовыми смесями с повышенным содержанием кислорода. Если нарушена деятельность сердца, то выполняют его непрямой массаж, а при необходимости — дефибрилляцию.

Устранение дефицита глюкозы в организме достигают путем введения ее растворов разной концентрации в сочетании с инсулином, а также витаминами.

Для восстановления энергетических ресурсов организма и профилактики гипогликемической комы пострадавшему необходимо ввести внутривенно 10–20 мл 40%-ного раствора глюкозы, подогретого до 40 °C. Показана инфузионная терапия подогретыми до 40 °C плазмозамещающими и солевыми растворами.

Из приведенного перечня видны те точки приложения высокотехнологичного инструментария, над созданием и совершенствованием которого сегодня активно работают специалисты.

В числе разработанных методов, для которых сегодня имеется аппаратное оснащение, на наш взгляд, заслуживают особый интерес метод инфузии подогретых растворов и дыхание подогретыми искусственными газовыми смесями.

Ранее отмечалось, что идея общего согревания организма КГС предложена специалистами ГНЦ РФ – ИМБП РАН, которые также успешно реализовали проведение КГТ с помощью разработанных аппаратов для медицинского обеспечения водолазных работ.

Высокоэффективным способом быстрого согревания ядра тела является дыхание подогретой КГС, например, с использованием аппарата типа «Ингалит» [52].

Особую роль в формировании современного понимания методологии и технологии КГТ имеет работа [3], которая была посвящена проблемам спасания подводников, но в то же время обладает большой общностью приложений благодаря адресации к естественным регуляторным физиологическим механизмам, пониманию путей постепенного восстановления резервов организма с учетом новых, вторичных рисков осложнений от внешнего вмешательства при реанимации пострадавшего в результате переохлаждения [54].

В ряде работ [52, 53, 55] описаны патофизиологические изменения, происходящие при согревании охлажденных до критической температуры тканей, что послужило основой для разработки оригинальных и эффективных методов оказания медицинской

помощи и составило теоретическую и методическую базу их применения для спасания водолазов при переохлаждении [56, 57].

Ключевой вывод состоит в том, что в случае нерационального подхода к отогреванию происходит усиление неблагоприятных реперфузионных эффектов, что углубляет деградацию внутренней среды организма и может привести к летальному исходу. Также при сильном общем переохлаждении нагрев отдельных участков тела (температурный градиент с ядром тела более 2 °C) опасен развитием некроза.

Таким образом, при наличии общей острой холодовой травмы необходимо в первую очередь приступить к согреванию пострадавших. Для выведения пострадавшего из состояния холодового шока одновременно с интенсивным согреванием проводят противошоковую терапию, и в этом отношении также заслуживает внимания опыт применения газовых смесей с добавлением гелия [58, 59].

При отморожении конечностей у пострадавшего необходимо снять кольца и браслеты, не рекомендуется растирать поражённые участки. Пострадавшим с оледенением и отморожением до момента согревания независимо от тяжести (глубины) отморожения конечности накладываются теплоизолирующие многослойные ватно-марлевые повязки толщиной не меньше 5 см от кончиков пальцев до уровня не менее чем на 20 см проксимальнее границы поражения. Повязки накладываются на период не меньше 12 ч. Необходима иммобилизация поврежденных конечностей при транспортировке. При наличии болевого синдрома проводится обезболивание. Для предупреждения дегидратации следует, по возможности, выполнить внутривенную инфузию изотоническими солевыми кристаллоидами [60].

Представляет интерес информация заведующего лабораторией Северо-Западного государственного университета им. И.И. Мечникова профессора В. Чащина об устрашающей ситуации с холодовыми травмами в России [61]. По его данным, ежегодно отмечается около 4 тыс. смертельных гипотермий, 12 тыс. ампутаций из-за обморожений. Средств профилактики таких травм в России нет. Инициатива сотрудников данного университета по подготовке государственных и межгосударственных программ развития арктической медицины несомненно нуждается в поддержке.

Разработка и внедрение новых инновационных технологий и средств медицинской помощи пострадавшим в экстремальных условиях должны быть продолжены.

Выводы

С целью эффективного осуществления работ по медицинскому обеспечению пострадавших в нештатных и аварийных ситуациях в условиях Арктики предлагается внедрение в практику следующих инновационных технологий:

- сокращение времени обнаружения пострадавших за счет использования при проведении поисково-спасательных работ современных беспилотных аппаратов и навигационного оборудования для быстрого и точного определения места нахождения происшествия;
- своевременное дооснащение поисково-спасательных отрядов необходимым имуществом для обеспечения выживания пострадавших, а также адресная и быстрая доставка на место происшествия дополнительного спасательного оборудования, индивидуального защитного снаряжения, медицинского имущества и инструментов с помощью роботизированных ассистивных средств, в частности, беспилотных летательных аппаратов;
- проведение неотложных медицинских мероприятий пострадавшим в жизнеугрожающих ситуациях с применением новейших инструментальных и роботизированных комплексов реанимации;
- мобилизация в кратчайшие сроки сил и средств спасательных служб и медицинского персонала различных ведомств и эффективная координация их деятельности при проведении мероприятий по поиску, спасанию и оказанию медицинской помощи пострадавшим непосредственно на месте инцидента и во время авиамедицинской эвакуации;
- использование дистанционной диагностики и мониторинга критических состояний пострадавших, включая последствия холодовой травмы, а также осуществление информационной поддержки пострадавших и спасателей;
- оснащение спасателей средствами для выполнения реанимационных мероприятий по восстановлению и поддержанию сердечной и дыхательной деятельности непосредственно на месте нештатной или аварийной ситуации при выявлении у пострадавших критических состояний;
- применение специальных медицинских технологий и оборудования для выведения пострадавших из состояния переохлаждения непосредственно на месте происшествия и в процессе авиамедицинской эвакуации в специализированные центры оказания помощи.

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

Список литературы

1. *Молчанов В.П., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации; МЧС России. М., 2011.

Molchanov V.P., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Risks of emergency situations in the Arctic zone of the Russian Federation; EMERCOM of Russia. Moscow, 2011.

- 2. *Тихонов Д.Г.* Арктическая медицина. 2010. *Tikhonov D.G.* The Arctic medicine. 2010.
- 3. Шелепов А.М., Чувашев М.Л., Седов И.В. и др. Арктика. Исторические аспекты освоения и современные проблемы // Вестн. Рос. воен.-мед. акад. 2014. № 1 (45). С. 212–219.

Shelepov A.M., Chuvashev M.L., Sedov I.V. et al. The Arctic. Historical aspects of development and modern problems // Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii. 2014. № 1 (45). P. 212–219.

4. Бойко Е.Р., Евдокимов В.Г., Вахнина Н.А. и др. Сезонные аспекты оксидативного стресса у человека в условиях Севера // Авиакосм. и экол. мед. 2007. Т. 41. \mathbb{N}^9 3. С. 44–48.

Boyko E.R., Evdokimov V.G., Vakhnina N.A. et al. Seasonal aspects of oxidative stress in humans in the North // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2007. T. 41. Nº 3. P. 44–48.

5. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года (утв. Президентом Российской Федерации 18 сентября 2008 г. № Пр-1969). [Электронный ресурс]. URL: // http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142561/ (доступ свободный, дата обращения: 15.12.2015).

Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and National Security for the period up to 2020 (app. The President of the Russian Federation on September 18, 2008 Nº PR-1969). [Electronic resource]. URL: // http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142561/ (Free access mode, accessed: 15.12.2015).

6. Горбунов А.А., Пономорчук А.Ю. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Арктической зоне Российской Федерации // Вестник Санкт-петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС РОССИИ. 2016. Вып. 4. URL: http://vestnik.igps.ru/wpcontent/uploads/V83/1.pdf (доступ свободный, дата обращения: 01.12.2019).

Gorbunov A.A., Ponomarchuk A.Yu. Protection of population and territories from emergency situations of natural and technogenic nature in the Arctic Zone of the Russian Federation // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS ROSSII. 2016. Is. 4. URL: http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/1.pdf (Free access mode, accessed: 01.12.2019).

7. Нестеренко А.Г. Анализ проблемы организации управления и взаимодействия при ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктическом регионе // Проблемы

управления рисками в техносфере. 2015. № 3 (35). С. 71–77.

Nesterenko A.G. Analysis of the problems of organization of management and interaction during elimination of emergency situations in the Arctic region // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2015. № 3 (35). P. 71–77.

8. Грязнов С.Н., Малышев В.П. Обеспечение комплексной безопасности при освоении ресурсной базы Арктической зоны Российской Федерации // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1. Т. 4. С. 62–66.

Gryaznov S.N., Malyshev V.P. Ensuring comprehensive security in the development of the resource base of the Arctic zone of the Russian Federation // Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya. 2014. № 1. V. 4. P. 62–66.

9. Воропаев Н.П. Применение беспилотных летательных аппаратов в интересах МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России 2014. № 4. С. 13–17.

Voropaev N.P. The Use of Unmanned Aerial Vehicles in the interests of EMERCOM of Russia // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii. 2014. Nº 4. P. 13–17.

10. Поисково-спасательные работы при помощи беспилотных летательных аппаратов. [Электронный ресурс]. URL: https://fireman.club/statyi-polzovateley/poiskovo-spasatelnyikh-rabotyi-pri-pomoshhi-bespilotnyikh-letatelnyikh-apparatov/ (доступ свободный, дата обращения: 01.12.2019).

Search and rescue operations using Unmanned Aerial Vehicles. [Electronic resource]. URL: https://fireman.club/statyi-polzovateley/poiskovo-spasatelnyih-rabotyi-pripomoshhi-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov/ (Free access mode, accessed 01.12.2019).

11. Коннова Л.А., Бончук Г.И. Об истории беспилотных летательных аппаратов и перспективах их использования в практике спасательных работ // Российские беспилотники. [Электронный ресурс]. URL: https://russiandrone.ru/publications/ob-istorii-bespilotnykh-letatelnykh-apparatovi-perspektivakh-ikh-ispolzovaniya-v-praktike-spasateln/(доступ свободный, дата обращения: 01.12.2019).

Konnova L.A., Bonchuk G.I. On the history of Unmanned Aerial Vehicles and the prospects of their use in the practice of rescue // Russian drones. [Electronic resource]. URL: https://russiandrone.ru/publications/ob-istorii-bespilotnykhletatelnykh-apparatov-i-perspektivakh-ikh-ispolzovaniya-v-praktike-spasateln/ (Free access mode, accessed 12.01.2019).

12. Попов Н.И., Ефимов С.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2012. [Электронный ресурс]. URL: http://uran.donntu.org/~masters/2017/etf/nizhenets/library/article2.htm (доступ свободный, дата обращения: 12.01.2019).

Popov N.I., Efimov S.V. Use of Unmanned Aerial Vehicles in the EMERCOM of Russia // Problems of safety in the aftermath of emergencies. 2012. [Electronic resource]. URL: http://

uran.donntu.org/~masters/2017/etf/nizhenets/library/article2.htm (Free access mode, accessed 01.12.2019).

13. Новости Ассоциации Аэронет (08.07.2018). В Росавиации обсудили регулирование рынка беспилотных авиационных систем. URL: https://aeronet.aero/news/2018_06_08_favt_uas_regulation (доступ свободный, дата обращения: 16.07.2019.).

AERONET Association news (08.07.2018). The Federal air transport Agency discussed the regulation of the market of unmanned aircraft systems. URL: https://aeronet.aero/news/2018_06_08_favt_uas_regulation (Free access mode, accessed 16.07.2019).

14. Чернышев Ю.П. Технологическое обеспечение интеграции БВС в общее воздушное пространство — существующее состояние и перспективы внедрения в Российской Федерации // Науч.-практ. конф. по развитию беспилотных авиационных систем АЭРОНЕТ 2016. (Москва, 15–17 сентября 2016 г.).

Chernyshev Yu.P. The technological support for the integration of UAVs into the common airspace - the current state and prospects of implementation in the Russian Federation // Scientific and practical conference on the development of unmanned aircraft systems AERONET 2016. (Moscow, 15–17 September 2016).

15. Овсяник А.И. Вектор развития: О новшествах, разрабатываемых в системе МЧС // Точка опоры. 2014. № 6. С. 5–7. [Электронный ресурс]. URL: https://rucont.ru/efd/423309 (Режим доступа свободный, дата обращения: 12.01.2019).

Ovsyanik A.I. The Vector of development of innovations developed in the system of EMERCOM // Tochka opory. 2014. N_{\odot} 6. P. 5–7. [Electronic resource]. URL: https://rucont.ru/efd/423309 (Free access mode, accessed 2019.01.12).

16. Картеничев А., Иванов А., Сукочев А. Задачи беспилотной авиации МЧС России в Арктической зоне. [Электронный ресурс]. URL: http://secuteck.ru/articles2/firesec/zadachi-bespilotnoy-aviatsii-mchs-rossii-v-arkticheskoy-zone (доступ свободный, дата обращения: 17.12.2018).

Kartenichev A., Ivanov A., Sukochev A. The tasks of Unmanned Aircraft of EMERCOM of Russia in the Arctic zone. [Electronic resource]. URL: http://secuteck.ru/articles2/firesec/zadachi-bespilotnoy-aviatsii-mchs-rossii-v-arkticheskoy-zone (Free access mode, accessed: 17.12.2018).

17. *Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А.* Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 60. № 3. С. 147–165.

Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavlyuk N.A. Modern developments of rescue robots: possibilities and principles of their application // Nauchny vestnik NGTU. 2015. V. 60. № 3. P. 147–165.

18. Лопота А.В., Шубин П.К. Перспективы развития инновационных робототехнических средств для поиска и спасания на море // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Вып. 5–6. СПб., 2014. С. 139–149.

Lopota A.V., Shubin P.K. Prospects of development of innovative robotic means for search and rescue at sea // Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu. Is. 5–6. St.-Petersburg, 2014. P. 139–149.

19. Дроны и роботы спешат на помощь утопающим. [Электронный ресурс]. URL: http://robotrends.ru/pub/1721/drony-i-roboty-speshat-na-pomosh-utopayushim (доступ свободный, дата обращения: 16.07.2019).

Drones and robots rush to the aid of drowning. [Electronic resource]. URL: http://robotrends.ru/pub/1721/drony-i-roboty-speshat-na-pomosh-utopayushim (Free access mode, accessed: 16.07.2019).

20. Куличенко А.Д., Шубин П.К. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для решения обзорно-поисковых и поисково-спасательных задач на море // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. \mathbb{N}° 1 (14). С. 45–50.

Kulichenko A.D., Shubin P.K. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles for the solution of survey and search and rescue tasks at sea // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2017. № 1 (14). P. 45–50.

21. Специалисты ИПМТ ДВО РАН разрабатывают новые подводные аппараты // Веб-сайт Военное обозрение. [Электронный ресурс]. URL: https://topwar.ru/58761-specialisty-ipmt-dvo-ran-razrabatyvayut-novye-podvodnye-apparaty.html (доступ свободный, дата обращения: 16.07.2019).

Specialists of IPMT Feb RAS develop new underwater vehicles // Web-site Topwar. [Electronic resource]. URL:https://topwar.ru/58761-specialisty-ipmt-dvo-ran-razrabatyvayut-novye-podvodnye-apparaty.html (Free access mode, accessed: 16.07.2019).

22. Комплексная безопасность 2014: роботы, беспилотники и другие суперразработки МЧС России. [Электронный ресурс]. URL: https://skandinavia.livejournal.com/92192.html (доступ свободный 16.07.2019).

Complex security 2014: robots, drones and other super-developments of EMERCOM of Russia. [Electronic resource]. URL: https://skandinavia.livejournal.com/92192.html (Free access mode, accessed: 16.07.2019).

23. В РФ создан человекоподобный робот-спасатель // Веб-сайт Фонда перспективных исследований. Электронный ресурс. URL: ttps://fpi.gov.ru/press/media/b_rf_sozdan_chelovekopodobniy_robot_spasately (доступ 2019/01/12) (доступ свободный, дата обращения: 16.07.2019).

In Russia created a humanoid robot lifeguard // Website of the Foundation for advanced research. [Electronic resource]. URL: ttps://fpi.gov.ru/press/media/b_rf_sozdan_chelovekopodobniy_robot_spasately (accessed 2019/01/12) (Free access mode, accessed: 16.07.2019).

24. Гетц Е. Зачем спасателям нужны дроны и что нужно учитывать разработчикам дронов // Веб-сайт Российские беспилотники. [Электронный ресурс]. URL:https://russiandrone.ru/news/zachem_spasatelyam_nuzhny_drony_i_chto_nuzhno_uchityvat_razrabotchikam_dronov/ (доступ свободный, дата обращения: 20.12.2018).

Goetz E. Why do people need to get the drones and what need to consider developers drones // Website of the Russian drones. [Electronic resource]. URL: https://russiandrone.ru/news/zachem_spasatelyam_nuzhny_drony_i_chto_nuzhno_uchityvat_razrabotchikam_dronov/ (Free access mode, accessed: 20.12.2018).

25. Berns K., Nezhadfard A., Tosa M., Balta H., De Cubber G. Unmanned ground robots for rescue tasks, search and rescue robotics // IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.69491. Available from: https://www.intechopen.com/books/search-and-rescue-robotics-from-theory-to-practice/unmanned-ground-robots-for-rescue-tasks (Free access mode, accessed: 17.12.2018).

26. Клементьева А. Дайджест новостей науки и техники. Робот-спасатель помогает аварийно-спасательным службам // Веб-сайт Наука 21 век. [Электронный ресурс]. URL: http://nauka21vek.ru/archives/48244 (доступ свободный, дата обращения: 17.12.2018).

Klementyeva A. WEB Rescue robot helps rescue services // Web-site The science of the 21st century. [Electronic resource]. URL: http://nauka21vek.ru/archives/48244 (Free access mode, accessed: 17.12.2018).

27. Роботы займутся спасением в Арктике/ Искусственный интеллект обеспечит взаимодействие наземных и воздушных дронов. [Электронный ресурс]. URL: https://iz.ru/699859/aleksandr-kruglov-aleksei-ramm/roboty-zaimutsia-spaseniem-v-arktike (доступ свободный, дата обращения: 17.12.2018).

Robots will be engaged in rescue in the Arctic/ Artificial intelligence will provide interaction between ground and air drones. [Electronic resource]. URL: https://iz.ru/699859/aleksandr-kruglov-aleksei-ramm/roboty-zaimutsia-spaseniem-v-arktike (Free access mode, accessed: 17.12.2018).

28. Васильев И.А., Куличенко А.Д. Алгоритмы подготовки группировки спасательных роботов для спасения людей, терпящих бедствие в морских условиях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 39–41.

Vasiliev I.A., Kulichenko A.D. Algorithms of preparation of rescue robots grouping for rescue of people in distress at sea // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2018. Nº 3 (20). P. 39–41.

29. Васильев И.А. Применение группировок мобильных роботов для проведения спасательных миссий в морских условиях // Там же. 2017. № 4. С. 6–9.

Vasiliev I.A. Application of groups of mobile robots for carrying out rescue missions in sea conditions // Ibid. 2017. N° 4. P. 6–9.

30. Васильев И.А. Анализ операций группы роботов для спасения людей, терпящих бедствие в морских условиях // Там же. 2018. \mathbb{N}^{0} 1. С. 10–13.

Vasiliev I.A. Analysis of operations of a group of robots to rescue people in distress in the sea // Ibid. 2018. № 1. P. 10-13.

31. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу, ред. М., 1998.

Support and force liquidation of emergency situations / S.K. Shoigu, ed. Moscow, 1998.

32. Геоинформационные системы и технологии. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gistechnik.ru/index.php/ru/blog/2012/04 (доступ свободный, дата обращения: 17.07.2019).

Geoinformation systems and technologies. [Electronic resource]. URL: http://www.gistechnik.ru/index.php/ru/blog/2012/04 (Free access mode, accessed: 17.07.2019).

33. *Шелепов А.М., Благинин А.А., Жуков А.А.* Перспективные технологии медицинского обеспечения войск // Воен.-мед. журн. 2013. № 6. С. 92–93.

Shelepov A.M., Blaginin A.A., Zhukov A.A. Perspective technologies of medical support of troops // Voennomeditsinsky zhurnal. 2013. № 6. P. 92–93.

34. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Марачев А.Г., Милованов А.П. Патология человека на Севере. М., 1985.

Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Marachev A.G., Milovanov A.P. Human pathology in the North. Moscow, 1985.

35. *Агаджанян Н.А., Торшин В.И.* Экология человека. М., 1994.

Agadzhanyan N.A., Torshin V.I. Human ecology. Moscow, 1994.

36. Кандор И.С. Очерки по физиологии и гигиене человека на Крайнем Севере. М., 1968.

Kandor I.S. Essays on the physiology and hygiene of man in the Far North. Moscow, 1968.

37. *Казначеев В.П.* Механизмы адаптации человека в условиях высоких широт. Л., 1980.

Kaznacheev V.P. Mechanisms of human adaptation in high latitudes. Leningrad, 1980.

38. Клинические аспекты полярной медицины / В.П. Казначеев, ред. М., 1986.

Clinical aspects of polar medicine / V.P. Kaznacheev, ed. Moscow, 1986.

39. *Халимов Ю.Ш., Загородников Г.Г., Боченков А.А. и др.* Адаптация военнослужащих к воздействию экстремальных факторов. 2011. Т. 12. Патологическая физиология. С. 178–183.

Khalimov Yu.S., Zagorodnikov G.G., Bochenkov A.A. et al. Adaptation of military personnel to the effects of extreme factors. 2011. V. 12. Pathological physiology. P. 178–183.

40. Максимов А.Л. Современные проблемы адаптационных процессов и экологии человека в приполярных и арктических регионах России, концептуальные подходы их решений // Научно-технические проблемы освоения Арктики: Научная сессия Общего собрания членов РАН (16 декабря 2014 г.). М., 2015. С. 384—398.

Maksimov A.L. The present aspects of adaptation and ecology of human in subpolar and polar regions of Russia, conceptual approach to its solving // Scientific and technical aspects of development of Arctic. Scientific session of General meeting of RAS members (December 16, 2014). Moscow, 2015. P. 384–398.

41. Чащин В.П., Величковский Б.Т. Взаимодействие организма и вредных веществ в условиях холода // Вестник АМН СССР. 1989. № 9. С. 21-26.

Chashchin V.P., Velichkovsky B.T. The interaction of the body and harmful substances in cold conditions // Vestnik AMN SSSR. 1989. № 9. P. 21–26.

42. Величковский Б.Т. Причины и механизмы снижения коэффициента использования кислорода в легких человека на Крайнем Севере // Биосфера. 2010. Т. 1. № 2. С. 213–217.

Velichkovsky B.T. Reasons and mechanisms for reducing the oxygen utilization rate in human lungs in the Far North // Biosfera. 2010. V. 1. № 2. P. 213–217.

43. Официальный веб-сайт НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина. Раздел «Подготовка. Уроки выживания в зимнем лесу». [Электронный ресурс]. URL: http://www.gctc.ru/main. php?id=4490 (доступ свободный, дата обращения: 17.07.2019).

The official web-site of Yu. Gagarin Cosmonaut Research & Training Center. Section «Preparation. Lessons of survival in the winter forest». [Electronic resource]. URL: http://www.gctc.ru/main.php?id=4490 (Free access mode, accessed: 17.07.2019).

44. Информационно-обучающий портал подготовки спасателей к действиям в условиях Арктической зоны «Арктика без опасности». [Электронный ресурс]. URL: http://arctica.igps.ru/. Раздел: Первая медицинская помощь. URL: // http://arctica.igps.ru/survival/info/7 (доступ свободный, дата обращения: 20.12.2018).

Information and training portal to prepare rescuers for action in the Arctic zone «Arctic without danger». [Electronic resource]. URL: http://arctica.igps.ru/. Section: First aid. URL: // http://arctica.igps.ru/survival/info/7 (Free access mode, accessed: 20.12.2018).

45. Инновационные разработки и технологии ГНЦ РФ – ИМБП РАН. [Электронный ресурс]. URL: http://inno.imbp.ru/medicine.php?tbl=2 (доступ свободный, дата обращения: 23.07.2019).

Innovative developments and technologies of SSC RF – IBMP RAS. [Electronic resource]. URL: http://inno.imbp.ru/medicine.php?tbl=2 (Free access mode, accessed: 23.07.2019).

46. *Красильникова И.М., Моисеева Е.Г.* Неотложная доврачебная медицинская помощь: Учеб. пос. М., 2015.

Krasilnikova I.M., Moiseeva E.G. Emergency medical care: Teaching aid. Moscow, 2015.

47. *Кузнецова Н.В., Орлова Т.Н., Скребушевская А.А.* Теория сестринского дела и медицина катастроф: Учеб. пос. М., 2014.

Kuznetsova N.V., Orlova T.N., Skrebushevskaya A.A. The theory of nursing and emergency medicine: Teaching aid. Moscow, 2014.

48. *Радушкевич В.Л., Барташевич Б.И., Ткаченко Н.В.* Особенности проведения реанимации у больных с переохлаждением // Неотложная медицина. 2010. № 4. С. 17–23.

Radushkevich V.L., Bartashevich B.I., Tkachenko N.V. Features of resuscitation in patients with hypothermia // Neotlozhnaya meditsina. 2010. Nº 4. P. 17–23.

49. Castellani J.W., Tipton M.J. Cold stress effects on exposure tolerance and exercise performance // Compr.

Physiol. 2015. Dec. 15. Nº 6 (1). P. 443–469. DOI: 10.1002/cphy.c140081.

- 50. *Cheshire W*. Thermoregulatory disorders and illness related to heat and cold stress // Auton. Neurosci. 2016. V. 196. P. 91–104. DOI: 10.1016/j.autneu. 2016.01.001.
- 51. Zafren K., Geisbrecht G.G., Danzl D.F. et al. Wilderness Medical Society practice guidelines for the out-of-hospital evaluation and treatment of accidental hypothermia: 2014 update // Wilderness Environ. Med. 2014. S66–S85. DOI: 10.1016/j.wem.2014.10.010 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25498264 (Free access mode, accessed: 23.07.2019).
- 52. Ингаляторы для дыхания подогретыми кислородно-гелиевой газовой смесью и лекарственными препаратами с возможностью искусственной вентиляции легких. Аппарат «Ингалит» // Веб-сайт ООО «Главмедздрав». [Электронный ресурс]. URL: http://www.nmg-msk.ru/katalog/medicinskoe-oborudovanie/anesteziologiya-reanimatologiya-kardiologiya/apparaty-dlya-reanimacii/apparaty-serii-ingalit/ingalit-v2/ (доступ 22.07.2019).

Inhalers for breathing heated oxygen-helium gas mixture and drugs with the possibility of artificial ventilation. Apparatus «Ingalit» // Web-site Glavmedzdrav. [Electronic resource]. URL:http://www.nmg-msk.ru/katalog/medicinskoe-oborudovanie/anesteziologiya-reanimatologiya-kardiologiya/apparaty-dlya-reanimacii/apparaty-serii-ingalit/ingalit-v2/(access 22.07.2019).

53. Павлов Н.Б., Гришин В.И., Логунов А.Т., Кузнецова Т.Е. Кислородно-гелиевая терапия при оказании помощи пострадавшим с эксидентальной гипотермией // Морская медицина. 2015. Т. 1. № 2. С. 47–54. URL: https://doi.org/10.22328/2413-5747-2015-1-2-47-54.

Pavlov N.B., Grishin V.I., Logunov A.T., Kuznetsova T.E. Oxygen-helium therapy in assisting victims with hypothermia accidentales // Morskaya medicina. 2015. T. 1. \mathbb{N}° 2. P. 47–54. URL: https://doi.org/10.22328/2413-5747-2015-1-2-47-54.

54. *Марини Д., Уиллер А*. Медицина критических состояний: Пер. с англ. М., 2002.

Marini D., Uiller A. Medicine of critical states: Transl. from English. Moscow, 2002.

55. *Ажаев А.Н.* Физиолого-гигиенические аспекты действия высоких и низких температур. М., 1979.

Azhaev A.N. Physiological and hygienic aspects of high and low tempe5ratures. Moscow, 1979.

56. Чумаков А.В., Черкашин Д.В. Влияние военно-профессиональных факторов на здоровье специалистов Военно-морского флота с учетом современного состояния и перспектив развития военно-морской терапии // Вестн. Рос. воен.-мед. акад. 2017. Т. 36. № 3. С. 15—23. [Электронный ресурс]. URL: https://journals.eco-vector.com/1682-7392/article/view/12174 (доступ свободный, дата обращения: 19.07.2019.).

Chumakov A.V., Cherkashin D.V. The influence of military-professional factors on the health of specialists of the Navy, taking into account the current state and prospects of development of naval therapy // Vestnik Rossiyskoy voennomeditsinskoy akademii. 2017. V. 36. Nº 3. P. 15–23. [Electronic

resource]. URL: https://journals.eco-vector.com/1682-7392/article/view/12174 (Free access mode, accessed: 19.07.2019).

57. Медицинская помощь водолазам при заболеваниях и травмах, связанных с профессиональной деятельностью: Пос. для врачей. М., 2009. URL: https://zin.ru/000_uchebniki/05599_vodolaz/000_Medicinskaja_pomoch_vodolazam_2009/016.htm (доступ свободный, дата обращения: 23.07.2019).

Medical assistance to divers in diseases and injuries associated with professional activities: Manual for doctors. Moscow, 2009. URL: https://zin.ru/000_uchebniki/05599_vodolaz/000_Medicinskaja_pomoch_vodolazam_2009/016.htm. (Free access mode, accessed: 23.07.2019).

58. Кислородно-гелиевая терапия в ЦКБ РАН // Вебсайт ЦКБ РАН. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ckbran.ru/method/kislorodno-gelievaya-terapiya. (доступ свободный, дата обращения: 22.07.2019).

Oxygen-helium therapy in SKH RAS // Web-site of SKH RAS. [Electronic resource]. URL: https://www.ckbran.ru/method/kislorodno-gelievaya-terapiya. (Free access mode, accessed: 22.07.2019).

- 59. Haverkamp F., Giesbrecht G., Tan E. The prehospital management of hypothermia An up-to-date overview // Injury. 2017. V. 49. DOI: 10.1016/j.injury. 2017.11.001.
- 60. Вихриев Б.С., Кичемасов С.Х., Скворцов Ю.Р. Местные поражения холодом. Л., 1991.

Vikhriev B.S., Kichemasov S.Kh., Skvortsov Yu.R. Local cold affections. Leningrad, 1991.

61. Когаловский В. В России готовятся несколько программ развития арктической медицины // [Электронный ресурс]. URL: https://medvestnik.ru/content/news/V-Rossiigotovyatsya-neskolko-programm-razvitiya-arkticheskoimediciny.html (доступ свободный, дата обращения 2020.02.24).

Kogalovskiy V. The several programs for development of arctic medicine are preparing now in Russia // [Electronic resource]. URL: https://medvestnik.ru/content/news/V-Rossii-gotovyatsya-neskolko-programm-razvitiya-arkticheskoi-mediciny.html (free access mode, accessed: 2020.02.24).

Поступила 04.09.2019

INNOVATIVE MEDICAL CARE TECHNOLOGIES FOR THE DAMAGED IN OFF-NOMINAL AND EMERGENCY SITUATIONS IN THE ARCTIC

Polyakov A.V.¹, Ilyin E.A.¹, Usov V.M.^{1, 2}, Dvornikov M.V.², Kuznetsova T.E.³, Kosachev V.E.⁴, Kryuchkov B.I.⁵

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

²Scientific Research Testing Centre Aerospace Medicine and Military Ergonomic of Central Scientific Research Institute of Air force, Ministry Defense, Russian Federation, Moscow ³Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow

⁴Sechenov First Moscow State Medical University ⁵Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center, Star city, Moscow region

We weighed up the integrated use of innovative technologies in medical care and preparation of injured people

for evacuation from an emergency site in the extreme Arctic environment. These include the IBMP-proposed approaches and protocols to rescue ice divers, as well as the cutting-edge robotic systems to support the search-and-rescue and evacuation activities such as drones, emergency location reporting systems, communication with and monitoring of rescue team shifting, robotic-assisted basic life support and resuscitation technologies etc.

Key words: critical state of organism, supercooling, freezing prevention, first medical aid to cold-injured people, drones, robotized biotechnical systems.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 5–21. УДК 615.835.56

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМАХ ДЕЙСТВИЯ И КЛИНИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ ИНГАЛЯЦИЙ КСЕНОНА В ЦЕЛЯХ НЕЙРОПРОТЕКЦИИ

Марченко Л.Ю., Сигалева Е.Э., Мацнев Э.И., Аникеев Д.А.

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

E-mail: golubajavoda@mail.ru

В литературе описаны органопротективные эффекты ксенона, гелия, аргона и криптона, однако биологические механизмы, благодаря которым благородные газы проявляют эти свойства, остаются недостаточно изученными. В данном обзоре обобщены результаты отечественных и зарубежных исследований по изучению механизмов действия благородного газа ксенона на клетки нервной ткани и освещены перспективы его применения в клинической практике для достижения нейропротективного эффекта.

Ключевые слова: ксенон, нейропротекция, инертные газы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 22–29.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-22-29

Тридцатые годы прошлого столетия ознаменовались открытием «азотного наркоза» — наркотического эффекта азота при дыхании сжатым воздухом при давлении 4—5 атм, ставившего под сомнение возможность выполнения водолазных работ на глубине более 30 м. Поиск методов и средств уменьшения неблагоприятных эффектов воздействия азота на организм человека привел исследователей к направленному изучению свойств элементов 8-й группы таблицы Менделеева — благородных инертных газов [1].

Благородные газы гелий, неон, аргон, криптон и ксенон являются газами без запаха и цвета. Общая особенность их атомов — заполненная внешняя электронная оболочка, препятствующая их взаимодействиям с другими веществами. Несмотря на невозможность формирования ковалентных связей, благородные газы проявляют широкий спектр биологических эффектов благодаря ван-дер-ваальсовым силам, с чем, по-видимому, связано широкое применение этих газов в медицине [2]. Для клинической практики помимо биологических свойств большой интерес представляют физические свойства этих газов.

Ксенон: открытие и путь к использованию в клинической практике

Ксенон был открыт в 1898 г. профессором Лондонского университета W. Ramsay во время

исследования компонентов жидкого воздуха. В том же году А.R. Венпке начал проведение планомерных исследований ксенона в качестве составной части искусственных дыхательных смесей, используемых водолазами при осуществлении глубоководных погружений. Опираясь на результаты своих исследований, он в 1939 г. описал возможность применения ксенона в качестве газообразного анестетика [3].

В 1941 г. отечественный физиолог Н.В. Лазарев теоретически обосновал и экспериментально доказал наркотическое действие инертных газов. Он показал, что эффект наркотического действия ксенона должен проявляться уже при атмосферном давлении в связи с относительно большой липофильностью [4]. В дальнейшем, наркотическое действие ксенона было подтверждено группой исследователей под руководством Ј.Н. Lawrence [5], а Cullen и Gross в 1951 г. первыми успешно применили ксеноновый наркоз на добровольцах [3].

Новая волна интереса специалистов к ксенону была обусловлена техническим прогрессом, появлением закрытых анестезиологических контуров и разработкой технологии рециклинга ксенона, благодаря чему перспектива клинического применения этого газа стала более выгодной, и в 1990-е гг. изучение биологических свойств ксенона активно продолжилось [5]. В процессе дальнейших экспериментальных исследований был подтвержден высокий профиль безопасности ксенона [6], отсутствие у него тератогенных свойств [7] и фетотоксического действия [8]. Способность данного газа легко проникать сквозь гематоэнцефалический барьер, возможность быстро индуцировать наркоз и обеспечивать быстрый выход из него, отсутствие у ксенона цвета и запаха обеспечили возможность его более широкого использования в анестезиологической практике и выдвинули данный газ в ряд «идеальных анестетиков» [6].

В 2000 г. ксенон был зарегистрирован в России в качестве анестетика, а в 2007 г. было получено разрешение на применение газа в 12 странах европейского сообщества [9].

Проведение исследований, направленных на изучение механизмов, благодаря которым ксенон реализует наркотический потенциал, привело к выводам о важнейшей роли NMDA-рецепторов в обеспечении ксенонового наркоза [10]. NMDA-рецепторы отвечают за восприятие боли, участвуют в образовании нейрональной сети, синаптической передаче импульсов, активно вовлекаются в острые и хронические неврологические патологические процессы [11]. В поражении тканей, вызванном воздействием гипоксии, ведущую роль играет именно активация NMDA-рецепторов, последующий оксидативный стресс и формирование активных форм кислорода [12]. Понимание механизмов воздействия ксенона на организм привело к развитию нового направления в применении этого газа - «органопротекции».

В 2004 г. был опубликована работа Preckel et al. о механизмах действия ксенона на организм человека в аспекте его применения в качестве «органопротекторного» средства в клинической практике [13]. В последующих исследованиях были экспериментально показаны защитные свойства ксенона в отношении сосудистого эндотелия [14], функции почек [15], а также его кардиопротекторные свойства [16]. Особый интерес для клинической практики представляют работы по изучению нейропротекторных свойств ксенона [17].

Механизмы нейропротекторного действия ксенона

Атомы ксенона, как и атомы других благородных газов, характеризуются заполненной электронной оболочкой, что препятствует образованию ковалентных связей с молекулами других веществ в нормальных условиях. Ксенон слаборастворим в жидких средах, обладает относительно высокой липофильностью, низкой токсичностью и выводится из организма в неизменном виде, преимущественно через легкие [2]. Способность ксенона к взаимодействию с белковыми и липидными компонентами клеточных структур была достоверно продемонстрирована при помощи ядерного магнитного резонанса [18].

Несмотря на химическую индифферентность и неспособность к образованию устойчивых связей, ксенон оказывает существенное воздействие на обменные и клеточные процессы. В 1961 г. химиком Л. Полингом при помощи рентгеноструктурного анализа была установлена способность анестетиков, включая ксенон, образовывать нестойкие соединения с молекулами воды – клатраты. Такие соединения образуются за счет возникновения ван-дер-вальсовых связей, которые значительно уступают в прочности ковалентным связям, поэтому гидратные соединения весьма непрочны и легко распадаются. При вступлении во взаимодействие с рецепторными участками мембран нервных клеток клатраты

изменяют скорость клеточной диффузии, поляризацию и пространственную ориентацию молекул в рецепторах, что приводит к нарушению передачи сигнала внутри нервной клетки [19].

По мнению В.В. Довгуши, ксенон способен не только создавать клатраты, но и изменять структуру молекул воды и образовывать водные ассоциаты после разрушения клатратов. Наркотическое действие на организм, по мнению профессора, оказывают ксеноновые кластеры, тогда как постксеноновые терапевтические эффекты, включая нейропротекторный эффект, объясняются действием водных ксеноновых ассоциатов [20].

В настоящее время хорошо известно, что основными точками приложения действия ксенона на клеточном уровне являются NMDA-рецепторы постсинаптических мембран, которым в современном представлении отдается ведущая роль в развитии нейродегенерации [10, 12]. Активация этих рецепторов приводит к повышению уровня внутриклеточного кальция, что, в свою очередь, вызывает стимуляцию синтеза оксида азота. Избыточная продукция оксида азота влечет за собой гиперактивацию гуанилатциклазы, значительное повышение уровня цГМФ, снижение концентрации АТФ. Происходит образование активных метаболитов (супероксиданиона, гидроксильного радикала, пероксинитрита), с последующим запуском перекисного окисления липидов. Повышенное образование свободных радикалов сопровождается гибелью клеток нервной ткани [21]. На основании имеющихся экспериментальных данных Lavaur et al. сделали вывод, что ксенон, препятствуя чрезмерной стимуляции NMDA-рецепторов, ингибирует эффекты эксайтотоксичности, ограничивая область распространения оксидативного стресса в тканях. Этой же группой исследователей были сделаны заключения, что нейротрофическое действие ксенона, вероятно, проявляется за счет повышения экспрессии белков ChAT вследствие ингибирования NMDA-рецепторов [22].

На сегодняшний день ряд авторов предполагает, что ксенон в NMDA-рецепторах взаимодействует с участками связывания глицина, являющегося агонистом рецепторов этого типа. В исследованиях с использованием экспериментальных моделей повреждения нервной ткани глицин значительно уменьшал нейропротекторные эффекты ксенона [23, 24]. В то же время, по данным Harris et al., даже при насыщающих концентрациях глицина ксенон оказывал ингибирующее действие на NMDAрецепторы, обеспечивая хоть и менее выраженный, но устойчивый нейропротективный эффект [23]. Роль участков связывания глицина NMDAрецепторов в опосредованном действии ксенона на сегодняшний день остается спорной и требует проведения дальнейших исследований [22].

Экспериментально показано, что ксенон ингибирует синаптические AMPA (alpha-amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionicacid)-рецепторы в префронтальной коре головного мозга и спинном мозге [12]. В исследовании in vivo с использованием экспериментальной модели повреждения спинного мозга был показан нейропротекторный эффект ксенона, который, по мнению авторов, был связан с вовлечением НМДА- и АМРА-рецепторов [25].

Данные, касающиеся воздействия ксенона на ГАМК-А-рецепторы, опосредующие в том числе поддержание сознания, весьма противоречивы. Так, по мнению de Souza et al., ксенон обладает слабовыраженным потенцирующим воздействием на эти рецепторы за счет подавления распространения потенциала действия по постсинаптической мембране [26]. Однако другой группой исследователей под руководством Hapfelmeier было установлено, что ксенон обратимо активизирует ГАМКергические синаптические токи за счет активации ионных каналов [27]. С другой стороны, по мнению Goto et al., ксенон вовсе не оказывает воздействия на рецепторы данного типа [28]. По-видимому, для разрешения этих противоречий требуется проведение дальнейших исследований.

Среди других механизмов воздействия ксенона на организм человека следует отметить его ингибирующее влияние на 5-НТЗ-рецепторы, активация которых может влиять на возникновение послеоперационной тошноты и рвоты, а также на центральную и периферическую ноцицепцию [29]. Возможно, именно с воздействием на 5-НТЗ-рецепторы связаны анальгезирующий и антидискомфортный эффекты ксенона.

Отмечая нейропротекторный эффект ксенона, следует учитывать не только прямое влияние этого газа на различные рецепторы нервной системы. Возможно, одним из звеньев в опосредовании нейропротекторного эффекта является способность ксенона воздействовать на секреторные клетки нейроэндокринной системы и высвобождение гуморальных факторов из нервных окончаний [30]. В работе Yoshida et al. было показано, что ксенон в экспериментальной модели in vivo стимулировал норадренергические нейроны гипоталамуса, что сопровождалось повышением концентрации норадреналина в ликворе животных [31].

Известно, что ксенон способен ингибировать тканевый активатор плазминогена, благодаря чему он является веществом, снижающим риски кровотечений после проведения тромболизиса у пациентов с ишемическим инсультом. Исследователи полагают, что ксенон благодаря своим нейротекторным свойствам и способности ингибировать тканевый активатор плазминогена может стать «золотым стандартом» при лечении пациентов с ишемическим инсультом после проведения тромболизиса [32].

Применение ксенона в целях нейропротекции: настоящее и будущее

Нейропротекторные вещества представляют большой интерес как при острых, так и при хронических патологических состояниях нервной системы.

Известно, что высокая летальность больных, связанная с остановкой сердечной деятельности и последующими структурными повреждениями головного мозга, занимает одну из лидирующих позиций в структуре смертности в США и Европе. В Российской Федерации, по опубликованным данным, внезапная остановка сердца ежегодно становится причиной смерти примерно 250 тыс. больных [9]. Даже в случае успешно проведенных реанимационных мероприятий сохраняется высокая летальность в связи со структурными повреждениями головного мозга, вызванными гипоксией. До настояшего времени в клинической практике сохраняется высокий процент послеоперационной инвалидизации больных за счет глубоких структурных повреждений ЦНС в связи с гипоксией головного мозга, особенно ввиду поражения гиппокампа [33].

Использование ксенона при проведении реанимационных мероприятий при остановке сердечной деятельности во время оперативных вмешательств показало его высокую лечебную эффективность, что нашло подтверждение в экспериментальных исследованиях in vivo [34]. В сравнительном исследовании, проводившемся с 2009 по 2015 г., были показаны преимущества комбинированной терапии с применением ксенона и гипотермии относительно монотерапии гипотермией [35]. В группе пациентов, получавших лечение ксеноном, по результатам диффузионной МРТ было выявлено значительно меньше повреждений белого вещества головного мозга, однако корреляции с уменьшением неврологических дефицитов у пациентов отмечено не было. Смертность в группе с применением ксенона и в контрольной группе составила 27,3 и 34,5 % соответственно.

Следует подчеркнуть, что при отработке методики проведения ксеноновой анестезии при внутричерепных нейрохирургических операциях и последующей оценке ее нейропротекторных эффектов не удалось выявить достоверных данных о нейропротекторных свойствах ксенона при интракраниальных операциях [36]. Полученные негативные результаты исследования, возможно, связаны с недостаточной концентрацией или недостаточной длительностью экспозиции ксенона.

В другом крупном мультицентровом рандомизированном клиническом исследовании специалистами проводилась оценка частоты возникновения послеоперационных осложнений (делирия, сепсиса и летальности) у пациентов, оперированных по поводу переломов бедренных костей с использованием ксенонового и севофлуранового наркоза.

Частота возникновения послеоперационного делирия существенно не отличалась в группах, однако у пациентов было отмечено существенное снижение летальности после применения ксенона в качестве анестетика (0 % против 3,8 % в контрольной группе). Специалисты заключают, что применение ксенонового наркоза в хирургической практике обеспечивает ряд преимуществ при лечении пациентов различного профиля [37].

Новорожденные с гипоксически-ишемическим поражением ЦНС представляют большую группу пациентов, требующую поиска новых безопасных средств нейропротекции. На сегодняшний день единственным применяемым в клинической практике методом нейропротекции при гипоксически-ишемическом поражении ЦНС является терапевтическая гипотермия. Важно подчеркнуть, что эффективность использования данного метода на сегодня, очевидно, недостаточна [38]. Исследования in vivo показали положительные эффекты использования ксенона в отношении исходов гипоксически-ишемического поражения ЦНС у новорожденных крыс [39]. В экспериментальных условиях был подтвержден синергетический эффект ксенона и терапевтической гипотермии [40].

В 2014 г. были опубликованы результаты исследования, в котором специалисты изучали возможность и безопасность комбинации терапевтической гипотермии с ксеноновыми ингаляциями у новорожденных при гипоксически-ишемическом поражении ЦНС. В ходе исследования не было выявлено побочных эффектов со стороны дыхательной, сердечно-сосудистой и нервной систем [41].

С 2012 по 2014 г. были проведены сравнительные исследования эффективности монотерапии при использовании метода гипотермии и комбинированной терапии с применением ксенона и гипотермии у новорожденных с признаками гипоксически-ишемического поражения ЦНС средней и тяжелой степени тяжести. Результаты исследования не выявили побочных эффектов ксенона. Вместе с тем авторы не отметили и существенных преимуществ использования комбинированной терапии в отношении неврологических исходов и выживаемости пациентов по сравнению с группой больных, использовавших гипотермию в качестве монотерапии [42]. По-видимому, для подтверждения эффекта комбинации ксенона и терапевтической гипотермии необходимо проведение дальнейших исследований с изучением эффекта различных концентраций и длительности воздействия ксенона.

Не только ургентная медицина нуждается в применении ксенона в качестве перспективного нейропротекторного средства. Липофильный газ оказывает действие на миелиновую оболочку нервов [2], что является патогенетической основой лечения болевого синдрома при поражении периферических

нервов и спинномозговых корешков с использованием ксенона в субнаркотических дозах. С 2006 г. в Главном военном клиническом госпитале им. акад. Н.Н. Бурденко Минобороны РФ проводятся исследования эффективности ксенона при лечении органических и функциональных заболеваний нервной системы: вертебро- и дискогенных болевых синдромов, нейропатической боли, головной боли напряжения и панических атак. Применение ингаляций ксенон-кислородной смеси у пациентов с нейропатической болью позволило значительно сократить или устранить возникновение болевых пароксизмов, а также снизить объемы используемой медикаментозной терапии [43].

В клинических исследованиях, проведенных А.П. Добровольским и соавт., была дана оценка эффективности монотерапии ксеноном у пациентов с паническими расстройствами [44]. Авторы отметили высокую терапевтическую эффективность данного газа в лечении панических атак с сохранением достигнутого эффекта в течение продолжительного времени после завершения указанной терапии. Отмечена хорошая переносимость терапии ксеноном, а также уменьшение выраженности сопутствующих депрессивных расстройств при отдаленном наблюдении. Авторы считают, что ксенон может быть рассмотрен в качестве альтернативы препаратам бензодиазепинового ряда при лечении этой категории пациентов.

В настоящее время кислородно-ксеноновые ингаляции нашли широкое применение при лечении больных с тревожно-депрессивными расстройствами различного генеза, что позволило значительно сократить фармакологическую нагрузку и сроки пребывания этих пациентов в стационаре [45].

Нейропротекторные свойства ксенона позволяют добиться антидепрессивного, анксиолитического, нормотимического и в некоторых случаях антипсихотического эффектов, благодаря чему кислородно-ксеноновые ингаляции лежат в основе программ реабилитации пациентов наркологического профиля [46]. Кроме того, благоприятное воздействие ксенона на психику человека может быть успешно реализовано в целях восстановления функциональных резервов нервной системы у лиц опасных профессий, чья работа связана с непосредственной угрозой жизни и здоровью.

Работы по изучению свойств ксенона, проведенные в ГНЦ РФ – ИМБП РАН, показали высокую эффективность ксенона при коррекции невротических расстройств, связанных со стрессом у лиц опасных профессий. У пациентов, получавших лечение ксеноном, отмечалось достоверное уменьшение проявления тревожного, психосоматического и депрессивного симптомокомплексов. Кроме того, была выявлена значительная динамика показателей электроэнцефалографии, свидетельствовавшая

о разрушении патологических нейронных связей, отвечавших за память о пережитом страхе, и формировании новых взаимосвязей между констелляциями нейронов [47].

Ксенон в терапевтических дозах, не вызывающих потери сознания при экспозиции любой длительности, представляется высокоэффективным инновационным средством для восстановления функционального состояния нервной системы лиц, работа которых сопряжена с высокими уровнями психоэмоциональной и физической нагрузок. Ю.А. Бубеевым и соавт. была показана высокая эффективность процедур ксенонотерапии у летчиков палубной авиации в условиях дальнего морского похода. Испытатели отмечали улучшение самочувствия и настроения, снижение уровня реактивной тревожности. Анализ результатов дополнительных исследований (измерение параметров гемодинамики, изучение вариабельности сердечного ритма) выявил стабилизацию вагосимпатического баланса организма, восстановление уровня функциональных резервов сердечно-сосудистой системы [48].

Изучение влияния ксенонотерапии на альпинистов в условиях высокогорья, переживающих перманентный психоэмоциональный стресс и физические перегрузки, также выявило тенденцию к повышению уровня функционального состояния испытателей, получавших лечение газовой смесью кислорода и ксенона. Так, показатели самочувствия, активности и настроения по шкале САН у испытателей опытной группы снижались статистически достоверно медленнее аналогичных показателей испытателей контрольной группы. Уровень реактивной тревожности альпинистов опытной группы соответствовал исходным значениям на протяжении всего исследования, в то время как у членов контрольной группы был отмечен значительный рост реактивной тревожности [49].

Исследования, проведенные в последние годы, открывают перед клинической медициной новые перспективы применения кислородно-ксеноновых ингаляций. В 2018 г. были опубликованы данные, свидетельствующие об эффективности применения ксенона в качестве нейропротектора при моделировании взрывной травмы головного мозга (in vitro), вплоть до 72 ч после повреждения [17]. В случае дальнейших трансляционных исследований в этом направлении применение ксенона позволит значительно расширить временные границы «терапевтического окна» при травматических повреждениях головного мозга.

Результаты недавнего исследования дофаминергических нейронов позволили авторам сделать вывод о потенциальной эффективности и перспективе использования ксенона в качестве средства лечения нейродегенеративных заболеваний, в частности, болезни Паркинсона [50].

Выводы

- 1. В отечественных и зарубежных публикациях убедительно продемонстрированы защитные свойства ингаляции ксенона в отношении нервной ткани.
- 2. Для эффективного использования нейропротекторного действия ксенона необходимо проведение дальнейших трансляционных исследований сочетания методов терапевтической гипотермии и ксенонотерапии у пациентов с гипоксически-ишемическим поражением ЦНС. Определение границ «терапевтического» окна при проведении ксеноновой нейропротекции может значительно изменить существующие протоколы лечения пациентов с поражением ЦНС различного генеза.
- 3. Изучение механизмов нейропротекторного действия ксенона, экспериментальное обоснование клинического применения и определение показаний к его использованию в лечении отдельных заболеваний позволят значительно расширить область применения кислородно-ксеноновых ингаляций в медицинской практике.

Работа выполнена в рамках Программы научных исследований президиума РАН «Фундаментальные исследования для биомедицинских технологий» на 2018–2020 гг.

Список литературы

- 1. Marx T., Schmidt M., Schirmer U., Reinelt H. Xenon as inhalation anaesthetic results from animal studies // Appl. Cardiopulmonary Pathophysiol. 2000. V. 9. P. 124–128.
- 2. Spaggiari S., Kepp O., Rello-Varona S. et al. Antiapoptotic activity of argon and xenon // Cell Cycle. 2013. V. 12. \mathbb{N} 16. P. 36-42.
- 3. Harris P.D., Barnes R. The uses of helium and xenon in current clinical practice // Anaesthesia. 2008. V. 63. P. 284–293.
- 4. *Назаров Е.И.* Озоновая, ксеноновая и озоно-ксеноновая терапия. Обзор // Вестник физиотерапии и курортологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 124–167.

Nazarov E.I. Ozone, xenon and ozone-xenon therapy. Overview // Vestnik fizioterapii i kurortologii. 2016. V. 22. \mathbb{N}° 2. P. 124–167.

- 5. Lachmann B. et al. Safety and efficacy of xenon in routine use as an inhalation anaesthetic // Lancet. 1990. V. 335. \mathbb{N}^9 8703. P. 1413–1415.
- 6. *Dworschak M.* Pharmacologic neuroprotection is xenon the light at the end of the tunnel? // Crit. Care Med. 2008. V. 36. P. 2477–2479.
- 7. *Kelen D., Robertson N.J.* Experimental treatments for hypoxic ischaemic encephalopathy // Early Hum. Dev. 2010. V. 86. P. 369–377.

- 8. Lane G.A., Nahrwold M.L., Tait A.R. et al. Anesthetics as teratogens: nitrous oxide is fetotoxic, xenon is not // Sci. 1980. V. 210. P. 899–901:
- 9. *Бокерия О.Л., Биниашвили М.Б.* Внезапная сердечная смерть и ишемическая болезнь сердца // Анналы аритмологии. 2013. Т. 2. С. 69–79.

Bokeria O.L., Biniashvili M.B. Sudden cardiac death and coronary heart disease // Annaly aritmologii. 2013. V. 2. P. 69–79.

- 10. Yamakura T., Harris R.A. Effects of gaseous anesthetics nitrous oxide and xenon on ligand-gated ion channels. Comparison with isoflurane and ethanol // Anesthesiol. 2000. V. 93. P. 95–101.
- 11. *Суслов Н.И., Потапов В.Н., Шписман М.Н. и др.* Применение ксенона в медицине / Н.И. Суслов, М.Н. Шписман, В.Н. Потапов, ред. Томск, 2009. С. 20–22.

Suslov N.I., Potapov V.N., Shpisman M.N. et al. Application xenon in medicine / N.I. Suslov, M.N. Shpisman, V.N. Potapov, eds. Tomsk, 2009. P. 20–22.

- 12. Brennan A.M., Suh S.W., Won S.J. et al. NADPH oxidase is the primary source of superoxide induced by NMDA receptor activation // Nat. Neurosci. 2009. V. 12. P. 857–863.
- 13. *Preckel B., Weber N., Schlack W.* Xenon noble gas with organprotective properties // Anasthesiol. Intensiv. Med. Notfall. 2004. V. 39. Nº 8. P. 56–62.
- 14. Weber N.C., Kandler J., Schlack W. et al. Intermitted pharmacologic pretreatment by xenon, isoflurane, nitrous oxide, and the opioid morphine prevents tumor necrosis factor alpha-induced adhesion molecule expression in human umbilical vein endothelial cells // Anesthesiol. 2008. V. 108. N_2 2. P. 199–207.
- 15. *Ma D., Lim T., Xu J. et al.* Xenon preconditioning protects against renal ischemic-reperfusion injury via HIF-1alpha activation // Am. Soc. Nephrol. 2009. V. 20. \mathbb{N}° 4. P. 13–20.
- 16. Weber N.C., Toma O., Wolter J.I. et al. The noble gas xenon induces pharmacological preconditioning in the rat heart in vivo via induction of PKC-epsilon and p38 MAPK // Br. J. Pharmacol. 2005. V. 144. Nº 1. P. 23–32.
- 17. Campos-Pires R., Koziakova M., Yonis A. et al. Xenon protects against blast-induced traumatic brain injury in an in vitro model // J.R. Neurotrauma. 2018. V. 35. № 8. P. 1037–1044.
- 18. Spence M.M., Ruiz E.J., Rubin S.M. et al. Development of a functionalized xenon biosensor // Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. № 46. P. 15287–15294.
- 19. *Довгуша В.В., Следков А.Ю*. Индифферентные газы, рецепция и наркоз. СПб., 2006. С. 101–103.

Dovgusha V.V., Sledkov A.Yu. Indifferent gases, reception and anesthesia. St.-Petersburg, 2006. P. 101–103.

20. Буров Н.Е. Представления о механизме анестезиологических и лечебных свойств ксенона // Ксенон и инертные газы в отечественной медицине: Сборник. М., 2010. С. 39–54.

Burov N.E. Ideas about the mechanism of anesthetic and therapeutic properties of xenon // Xenon and inert gases in domestic medicine: Compilation. Moscow, 2010. P. 39–54.

- 21. *Kobayashi H., Suzuki T., Saito S.* Toxicological significance and physiological role of nitric oxide // Toxicol. & Ecotoxical. News/Reviews. 1997. V. 4. № 1. P. 15–19.
- 22. Lavaur J., Lemaire M., Pype J.D. et al. Xenon-mediated neuroprotection in response to sustained, low-level excitotoxic stress // Cell Death Discovery. 2016. V. 2. P. 16–18.
- 23. Harris K., Armstrong S.P., Campos-Pires R. et al. Neuroprotection against traumatic brain injury by xenon, but not argon, is mediated by inhibition at the N-methyl-D-aspartate receptor glycine site // Anesthesiol. 2013. V. 119. P. 1137–1148.
- 24. Dickinson R., Peterson B.K., Banks P. et al. Competitive inhibition at the glycine site of the N-methyl-D-aspartate receptor by the anesthetics xenon and isoflurane: evidence from molecular modeling and electrophysiology // Anesthesiol. 2007. V. 107. P. 756–767.
- 25. *Yang Y.W., Wang Y.L., Lu J.K. et al.* Delayed xenon post-conditioning mitigates spinal cord ischemia/reperfusion injury in rabbits by regulating microglial activation and inflammatory factors // Neural Regen. Res. 2018. V. 13. № 3. P. 510–517.
- 26. DeSousa S.L., Dickinson R., Lieb W.R., Franks N.P. Contrasting synaptic actions of the inhalational general anesthetics isoflurane and xenon // Anesthesiol. 2000. V. 92. \mathbb{N}^9 4. P. 1055–1066.
- 27. Hapfelmeier G., Zieglgansberger W., Haseneder R. et al. Nitrous oxide and xenon increase the efficacy of GABA at recombinant mammalian GABA(A) receptors // Anesth. Analg. 2000. V. 91. N_2 6. P. 1542–1549.
- 28. Goto T., Hanne P., Ishiguro Y. et al. Cardiovascular effects of xenon and nitrous oxide in patients during fentanylmidazolam anaesthesia // Anaesthesia. 2004. V. 59. № 12. P. 78–83.
- 29. Suzuki T., Koyama H., Sugimoto M. et al. The diverse actions of volatile and gaseous anesthetics on human-cloned 5-hydroxytryptamine 3 receptors expressed in Xenopus oocytes // Anesthesiol. 2002. V. 96. P. 699–704.
- 30. *Суслов Н.И., Потапов В.Н., Шписман М.Н. и др.* Применение ксенона в медицине / Н.И. Суслов, М.Н. Шписман, В.Н. Потапов, ред. Томск, 2009. С. 217.

Suslov N.I., Potapov V.N., Shpisman M.N. et al. Application xenon in medicine / N.I. Suslov, M.N. Shpisman, V.N. Potapov, eds. Tomsk, 2009. P. 217.

- 31. *Yoshida H., Kushikata T., Tose R. et al.* Nitrous oxide and xenon increase noradrenaline release in the cerebral cortex in vivo and in vitro // Neurosci. Lett. 2010. V. 469. \mathbb{N}° 2. P. 199–203.
- 32. David H.N. et al. Xenon is an inhibitor of tissue-plasminogen activator: adverse and beneficial effects in a rat model of thromboembolic stroke // J. of Cerebral Blood Flow & Metabolism. 2010. V. 30. N_2 4. P. 718–728.
- 33. Zola-Morgan S., Squire L.R., Rempel N.L. et al. Enduring memory impairment in monkeys after ischemic damage to the hippocampus // J. Neurosci. 1992. V. 12. P. 2582–2596.
- 34. Fries M., Nolte K.W., Coburn M. et al. Xenon reduces neurohistopathological damage and improves the early

neurological deficit after cardiac arrest in pigs // Crit. Care Med. 2008, V. 36. P. 2420–2426.

- 35. Laitio R., Hynninen M., Arola O. et al. Effect of inhaled xenon on cerebral white matter damage in comatose survivors of out-of-hospital cardiac arrest: a randomized clinical trial // JAMA. 2016. V. 315. № 11. P. 1120–1128.
- 36. *Мизиков В.М., Вяткин А.А., Петросян Л.Г. и др.* Комбинированная анестезия на основе ксенона и оценка возможности ее применения как метода нейропротективного воздействия при внутричерепных операциях // Клин. и эксперим. хирургия. Журнал им. акад. Б.В. Петровского. 2013. № 1. С. 58–69.

Mizikov V.M., Vyatkin A.A., Petrosyan L.G. et al. Xenon-based combined anesthesia and assessment of the possibility of its use as a method of neuroprotective effects in intracranial operations. // Klinicheskaya i eksperimental'naya khirurgiya. Zhurnal imeni akademika B.V. Petrovskogo. 2013. N°_{2} 1. P. 58–69.

- 37. Cremer J., Stoppe C., Fahlenkamp A.V. et al. Early cognitive function, recovery and well-being after sevoflurane and xenon anaesthesia in the elderly: a double-blinded randomized controlled trial // Med. Gas Res. 2011. V. 1. № 1. P. 9–19.
- 38. Wachtel E.V., Hendricks-Munoz K.D. Current management of the infant who presents with neonatal encephalopathy // Curr. Probl. Pediatr. Adolesc. Health Care. 2011. V. 41. P. 132–153.
- 39. Dingley J., Tooley J., Porter H., Thoresen M. Xenon provides short-term neuroprotection in neonatal rats when administered after hypoxia-ischemia // Stroke. 2006. V. 37. \mathbb{N}° 2. P. 501–506.
- 40. Sabirmen W.L., Dingley J., Smit E. et al. Combined treatment of xenon and hypothermia in newborn rats additive or synergistic effect? // PLoS One. 2014. V. 9. P. 10–15.
- 41. Dingley J., Tooley J., Liu X. et al. Xenon ventilation during therapeutic hypothermia in neonatal encephalopathy // A Feasibility Study Pediatrics. 2014. V. 133. N_{\odot} 5. P. 809–818.
- 42. Azzopardi D., Robertson N.J., Bainbridge A. et al. Moderate hypothermia within 6 h of birth plus inhaled xenon versus moderate hypothermia alone after birth asphyxia (TOBY-Xe): a proof-of-concept, open-label, randomised controlled trial // Lancet Neurol. 2016. V. 15. Nº 2. P. 145–153.
- 43. *Буров Н.Е.* Патогенетические основы ингаляционной терапии ксеноном // Ксенон и инертные газы в медицине: Матер. третьей конф. анестезиол.-реаниматол. мед. уч. МО РФ. М., 2012. С. 25–30.

Burov N.E. Pathogenetic basis of xenon inhalation therapy // Xenon and inert gases in medicine: Proc. of the third conference of anesthesiology-resuscitation medical institutions of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, 2012. P. 25–30.

44. *Dobrovolsky A., Ichim T.E., Kesari S., Bogin V.* Xenon in the treatment of panic disorder: an open label study // Transl. Med. 2017. V. 15. P. 137.

45. Шурыгин В.В., Кутушев О.Т. Применение ингаляции ксенон-кислородной смеси в комплексной терапии тревожно-депрессивных расстройств // Ксенон и инертные газы в медицине: Сборник. М., 2008. С. 171–177.

Shurygin V.V., Kutushev O.T. The use of xenon-oxygen mixture inhalation in the treatment of anxiety-depressive disorders // Xenon and inert gases in medicine: Compilation. Moscow, 2008. P. 171–177.

46. Цыганков Б.Д., Шамов С.А., Рыхлецкий П.З., Давлетов Л.А. Возможности применения ксенона в комплексной терапии психопатологических расстройств у больных наркологического профиля // Рос. мед. журнал. 2013. \mathbb{N} 4. С. 11–13.

Tsygankov B.D., Shamov S.A., Rykhletsky P.Z., Davletov L.A. Possibilities of using xenon in the complex therapy of psychopathological disorders in patients with drug addiction // Rossiyskiy meditsinskiy zhurnal. 2013. № 4. P. 11–13.

47. Игошина Т.В., Счастливцева Д.В., Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. Динамика ЭЭГ-паттернов при коррекции стресс реакций методом ингаляции ксенона // Вестник восстановительной медицины. 2017. Т. 77. № 1. С. 116—121.

Igoshina T.V., Schastlivtseva D.V., Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A. Dynamics of EEG patterns in the correction of stress reactions by xenon inhalation // Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny. 2017. V. 77. № 1. P. 116–121.

48. Бубеев Ю.А., Кальманов А.С., Котровская Т.И. Коррекция функционального состояния летчиков палубной авиации с помощью курса ингаляций терапевтических доз ксенона в условиях дальнего морского похода // Авиакосм. и экол. мед. 2011. № 4. С. 10—15.

Bubeev Yu.A., Kalmanov A.S., Kotrovskaya T.I. Correction of the functional state of deck aviation pilots using a course of inhalation of therapeutic doses of xenon in a long sea voyage // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2011. NP 4. P. 10-15.

49. *Кальманов А.С., Бубеев Ю.А., Котровская Т.И.* Влияние курсового применения ингаляций ксеноно-кислородной газовой смеси на показатели функционального состояния альпинистов // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2011. № 3. С. 27–34.

Kalmanov A.S. Bubeev Yu.A., Kotrovskaya T.I. The effect of the course application of inhalation of xenon-oxygen gas mixture on the indicators of the functional state of climbers // Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina. 2011. N_{\odot} 3. P. 27–34.

50. Lavaur J., Le Nogue D., Lemaire M. et al. The noble gas xenon provides protection and trophic stimulation to midbrain dopamine neurons // Neurochem. 2017. V. 142. N° 1. P. 14–28.

Поступила 16.01.2020

CURRENT VIEW OF THE ACTION MECHANISMS AND CLINICAL USE OF XENON INHALATIONS FOR THE PURPOSES OF NEUTROPROTECTION

Marchenko L.Yu., Sigaleva E.E., Matsnev E.I., Anikeev D.A.

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

There is literature regarding the organ-protecting effect of xenon, helium, argon and krypton, however, the biological mechanisms underlying this property of noble gases are still poorly understood. The review summarizes the results of Russian and international studies of the xenon action on nervous cells and dwells on clinical applications of this gas as a neuroprotective agent.

Key words: xenon, neuroprotection, inertial gases.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 22–29.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 629.7.048

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И РАСЧЕТ ЗАТРАТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПОЛЕТОВ

Кудрявцева Н.С., Сорокин А.Е.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

E-mail: nkudr@mai.ru

Проведены анализ и сравнение различных способов обеспечения высокой надежности систем жизнеобеспечения (СЖО) космических аппаратов для 1000-суточного автономного полета за орбиту Земли и Луны и выполнен предварительный прогноз затрат на их разработку. Надежность СЖО определяется вероятностью потери экипажа, а затраты учитывают стоимость разработки высоконадежных СЖО с вероятностью отказов равной 0,001 на время полета 1000 сут. Рассмотрены 3 типовых варианта физико-химических регенерационных СЖО с различной степенью замкнутости: комбинированная СЖО, частично замкнутая СЖО и максимально замкнутая СЖО.

Показано, что усовершенствование начальных базовых вариантов СЖО и доведение их надежности до требуемого уровня на время 1000 сут нецелесообразно, так как требует чрезмерно больших стоимостных затрат. Общее ненагруженное резервирование базовых вариантов СЖО приводит к значительному увеличению стоимости их разработки и массы: в 4 раза для комбинированной СЖО и в 6 раз для частично и максимально замкнутых СЖО.

Минимальные стоимость разработки и масса достигаются при раздельном способе ненагруженного резервирования подсистем регенерации СЖО. По сравнению с общим резервированием для комбинированной СЖО кратность резервирования снижается на единицу, а для частично и максимально замкнутых СЖО — на две единицы.

Ключевые слова: система жизнеобеспечения, вероятность потери экипажа, стоимостные затраты.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. T. 54. № 2. C. 30–37.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-30-37

При традиционном подходе при выборе варианта системы жизнеобеспечения (СЖО) для долговременных автономных полетов предлагается минимизировать массу и объем расходуемых и запасных материалов и оборудования, что приводит к снижению стартовой массы и занимаемого системой объема на борту космического аппарата

(КА). Поэтому, например, для экспедиций к Марсу и для лунной обитаемой базы предлагается разработка регенерационной физико-химической СЖО с максимальной степенью замкнутости круговорота веществ, потребляемых и выделяемых экипажем, и даже рассматривается введение в состав СЖО оранжереи [1–7]. Однако чем выше степень замкнутости, тем ниже надежность СЖО и тем выше будут массовые и стоимостные затраты для обеспечения требуемого высокого уровня надежности СЖО.

Надежность СЖО оценивается вероятностью потери экипажа, которая не должна превышать $F_m = 0,001$ за все время полета, которое принято равным T = 1000 сут [7]. Причинами потери экипажа могут быть отказы в подсистемах регенерации СЖО, приводящие к прекращению выработки кислорода, а также отсутствие питьевой воды и избыток углекислого газа в атмосфере гермообъема в течение 2-3 дней.

В ряде работ [8–10] рассмотрены методы обеспечения требуемого уровня надежности регенерационных СЖО и проведена оценка их стоимости на основе характеристик элементов и подсистем регенерации СЖО, разработанных в США и используемых на Международной космической станции (МКС).

В данной статье ставится задача: провести сравнение различных способов повышения надежности СЖО и дать первоначальную упрощенную оценку их стоимости разработки на базе характеристик регенерационных подсистем СЖО, применяемых в российском сегменте МКС. Рассматриваются 3 типовых варианта физико-химических регенерационных СЖО с различной степенью замкнутости [11, 12]: комбинированная СЖО, частично-замкнутая СЖО и максимально-замкнутая СЖО, которые должны иметь вероятность потери экипажа не выше $F_m = 0,001$ в течение T = 1000 сут полета без возможности пополнения запасов с Земли.

Рассмотрены следующие способы повышения надежности СЖО:

- 1. Усовершенствование базовых СЖО и доведение их надежности до требуемого уровня.
- 2. Общее ненагруженное резервирование базовых СЖО.
- 3. Общее ненагруженное резервирование усовершенствованных СЖО.
- 4. Раздельное ненагруженное резервирование базовых подсистем регенерации СЖО, дана предварительная оценка стоимости их разработки.

Под общим резервированием понимается резервирование СЖО в целом, а под раздельным резервированием – резервирование отдельных подсистем регенерации СЖО. При ненагруженном резервировании работает одна система, а все ее резервные системы находятся в отключенном состоянии. При выходе из строя работающей системы включается одна из резервных систем и т.д.

Оценка показателей надежности и стоимости СЖО

Надежность систем жизнеобеспечения

Надежность СЖО Р определяется через вероятность потери экипажа Q(LOC): P = Q(LOC) за время полета T из-за отказов подсистем СЖО без учета вероятностей фатальных ошибок экипажа и отказа обеспечивающих СЖО. Предварительная оценка надежности СЖО проводится с учетом следующих допущений:

- 1. Все отказы являются статистически независимыми, и отказы по общей причине не рассматриваются.
- 2. Период наработки уже закончен, и отказы вследствие изнашивания и старения не рассматриваются. Поэтому интенсивности отказов λ , отк/сут всех элементов, блоков и подсистем не изменяются и являются постоянными за время полета.
- 3. Время на замену отказавших элементов, блоков, подсистем и систем на резервные пренебрежимо мало, и вероятность отказа переключателей равна нулю.
- 4. Надежность элементов, блоков, подсистем и систем подчиняется экспоненциальному закону для вероятности безотказной работы, а вероятность отказов выражается в виде

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

при $\lambda \leq 10^{-4}$ отк/сут, t < 1000 сут. Время наработки на отказ равно *MTBF* = $1/\lambda$, сут.

Признано, что создание регенерационной СЖО для межпланетных полетов будет основано на подсистемах регенерации, реализованных для орбитальных станций [1, 4]. Поэтому оценка надежности 3 типовых вариантов физико-химических СЖО на срок T=1000 сут полета проводится с учетом значений интенсивности отказов, полученных по

эксплуатационным данным с МКС, из источников литературы и путем предварительного расчета по аналогам для перспективных подсистем [3, 4, 12–16].

Комбинированная СЖО содержит 2 жизненно важные подсистемы: блок сбора и концентрации углекислого газа и блок сбора и регенерации воды из конденсата атмосферной влаги, имеющие время наработки на отказ MTBF = 360 сут. Их надежность определяет надежность всей комбинированной СЖО, так как время наработки на отказ емкостей для воды и продуктов питания и баллонов с кислородом выше на 4 порядка. Тогда интенсивность отказов комбинированной СЖО можно оценить как $\lambda = 2/MTBF = 2/360 = 0,00556$ отк/сут, а вероятность потери экипажа будет равна $F_1(LOC) = 0,999$ за первые 180 сут полета.

Частично замкнутая СЖО содержит 5 жизненно важных подсистем, определяющих надежность СЖО: блок сбора и концентрации углекислого газа; блок сбора и регенерации воды из конденсата атмосферной влаги; блок регенерации воды из урины, имеющих время наработки на отказ 360 сут; блок генерации кислорода на основе электролиза воды; блок регенерации углекислого газа в реакторе Сабатье, имеющих время наработки на отказ 370 сут. Тогда интенсивность отказов частично замкнутой СЖО можно оценить как $\lambda = 3/360 + 2/370 = 0,0137$ отк/сут, и для нее $F_2(LOC) = 0,999$ за первые 73 сут полета.

Максимально замкнутая СЖО содержит 6 жизненно важных подсистем, определяющих ее надежность: блок сбора и концентрации углекислого газа; блоки сбора и регенерации воды из конденсата атмосферной влаги и урины, имеющих время наработки на отказ 360 сут; блок частичной генерации кислорода на основе электролиза воды; блок регенерации углекислого газа на основе его электролиза на оксид углерода и кислород; блок переработки оксида углерода в углекислый газ и углерод в реакторе Бодуара, имеющих наработку на отказ 370 сут. Интенсивность отказов максимально замкнутой СЖО можно оценить как $\lambda = 3/360 + 3/370 = 0,0164$ отк/сут, и для нее $F_3(LOC) = 0,999$ за первые 60 сут полета.

Отметим, что для регенерационных СЖО, основанных на технологиях жизнеобеспечения, используемых в американском сегменте МКС, время работы до первого отказа составляет 63–73 сут полета [7, 8, 17].

Для того, чтобы увеличить начальную базовую надежность СЖО на современной элементной базе, воспользуемся традиционным приемом со следующими требованиями [1, 8]:

1. Подсистемы СЖО должны быть ремонтопригодными с возможностью быстрой замены экипажем наиболее часто отказывающих элементов, блоков

и агрегатов. К группе сменного оборудования целесообразно отнести клапаны, микронагнетатели, насосы, механические фильтры, разъемы, датчики, электрические усилители и преобразователи и другие элементы.

- 2. Сменное оборудование должно быть унифицировано с возможностью его использования в различных подсистемах СЖО.
- 3. Введение достаточного количества сменного оборудования позволяет уменьшить интенсивность отказов регенерационных СЖО в 20 раз, но увеличивает эквивалентную массу СЖО примерно на 50 %.

В табл. 1 приведены новые значения интенсивностей отказов 3 типовых вариантов регенерационных СЖО и их вероятности отказов за время T=1000 сут. Эти значения принимаются за базовые характеристики типовых вариантов СЖО, для которых далее проводится анализ и оценка стоимости различных способов повышения надежности.

Стоимость повышения базовой надежности СЖО

Для предварительной оценки стоимости усовершенствования системы с целью повышения ее начальной базовой надежности без введения резервирования могут быть применены 3 модели «стоимость – надежность» [9, 10, 18]:

- 1. Логарифмическая модель, для которой $C = C_0[1 + log_2(F_0/F)]$, где C_0 , F_0 стоимость разработки системы с начальной базовой надежностью F_0 за T сут; C, F стоимость разработки усовершенствованной системы с надежностью F за T сут.
- 2. Обратно пропорциональная модель, для которой $C = C_0(F_0/F)^a$; $\alpha = (0,5-1,5)$ коэффициент, зависящий от уровня разработки и производства; принимаем $\alpha = 1$.
- 3. Экспоненциальная модель, для которой $C = C_0 \exp[(F_0/F)-1]$. Эта модель является наиболее часто используемой на практике.

Далее проводятся оценки стоимости усовершенствования СЖО по 3 моделям «стоимость – надежность».

Анализ способов повышения надежности регенерационных СЖО

Усовершенствование базовой СЖО

Предполагается, что мы можем усовершенствовать базовую СЖО i-го варианта и снизить ее вероятность отказов от начального значения F_{oi} за T=1000 сут до значения F_i за T=1000 сут. Стоимость разработки базовой СЖО i-го варианта обозначаем через C_{oi} , а стоимость разработки усовершенствованной СЖО — через C_i . В табл. 2 представлены результаты оценки стоимостей усовершенствования 3 вариантов регенерационных СЖО с базовыми характеристиками надежности,

приведенными в табл. 1, до вероятности отказов F = [0,001-0,7] за T = 1000 сут.

Из полученных расчетов видно, что из-за ограничений по стоимости уменьшить начальную базовую вероятность отказов регенерационных СЖО представляется возможным не более чем в 3 раза. Поэтому для повышения надежности СЖО следует использовать резервирование.

Общее ненагруженное резервирование базовой СЖО

Рассматривается общее ненагруженное резервирование, так как нагруженное резервирование, предлагаемое для СОЖ в работах [9, 10], приводит к увеличению габаритов и массы системы, повышенному расходу электроэнергии и дает меньшую надежность при одинаковой кратности с ненагруженным резервированием. Ненагруженное резервирование имеет один существенный недостаток — в период переключения СЖО на резервную систему могут временно ухудшиться условия среды обитания в гермообъеме.

Для 3 вариантов базовых регенерационных СЖО рассчитаем требуемую кратность N_i , (i=1,2,3) общего ненагруженного резервирования для обеспечения требуемого уровня отказов $F_m=0,001$ в течение T=1000 сут из следующего выражения:

$$\left(F_{0i}\right)^{N_i}/N_i! \le F_m. \tag{1}$$

Для комбинированной СЖО требуемая кратность резервирования $N_1=4$; для частично замкнутой и максимально замкнутой СЖО $N_2=N_3=6$. Соответственно стоимости производства таких СЖО становятся равными $C_1=4$ C_{01} , $C_2=6$ C_{02} , $C_3=6$ C_{03} . Получаем значительное увеличение массы и стоимости. Поэтому далее предлагается рассмотреть способ уменьшения массы и стоимости при общем ненагруженном резервировании усовершенствованной СЖО с улучшенными показателями надежности.

Общее ненагруженное резервирование усовершенствованной СЖО

Рассматривается задача выбора кратности ненагруженного резервирования N_i усовершенствованной СЖО i-го варианта с доведением ее вероятности отказов за T=1000 сут от F_{0i} до выбираемого значения F_i из условия достижения вероятности отказов резервированной СЖО требуемого уровня $F_m=0{,}001$ и минимизации стоимости доработки и резервирования системы.

Вероятность отказов усовершенствованной СЖО i-го варианта за T=1000 сут с учетом N_i — кратного общего ненагруженного резервирования должна быть равна F_m и выражается в виде

Таблица 1

Интенсивность и вероятность отказов за время	T = 1000 сут для базовых вариантов регенер	апионных СЖО
THE CHANGE OF THE PROPERTY OF	I - IOOO CY I DIN OGSOBBIA BUPNUILIOB PCI CIICP	AUDICITION CONC

Вариант СЖО	Интенсивность отказов, $\lambda_{i'}$ отк/сут	Вероятность отказов за $T = 1000$ сут, F_{0i}
Комбинированная	0,000278	0,278
Частично замкнутая	0,0007	0,7
Максимально замкнутая	0,000836	0,836

их отказов за T = 1000 сут

 Таблица 2

 Стоимость усовершенствования 3 базовых вариантов СЖО и снижения вероятности

i	F _i	$C_i = C_{0i}[1 + log_2(F_{0i}/F_i)]$	$C_i = C_{0i}(F_{0i}/F_i)$	$C_i = C_{0i} \exp[(F_{0i}/F_i)-1]$	
1	•	Комбинированная СЖО			
	0,001	9,12 C ₀₁	278 C ₀₁	e ²⁷⁷ C ₀₁	
	0,01	5,8 C ₀₁	27,8 C ₀₁	e ²⁷ C ₀₁	
	0,1	2,48 C ₀₁	2,78 C ₀₁	6 C ₀₁	
	0,25	1,15 C ₀₁	1,11 C ₀₁	1,12 C ₀₁	
2	Частично замкнутая СЖО				
	0,001	10,45 C ₀₂	700 C ₀₂	e ⁶⁹⁹ C ₀₂	
	0,01	7,1 C ₀₂	70 C ₀₂	e ⁶⁹ C ₀₂	
	0,1	3,8 C ₀₂	7 C ₀₂	403 C ₀₂	
	0,25	2,5 C ₀₂	2,8 C ₀₂	6 C ₀₂	
	0,5	1,5 C ₀₂	1,4 C ₀₂	1,5 C ₀₂	
3	Максимально замкнутая СЖО				
	0,001	10,71 C ₀₃	836 C ₀₃	e ⁸³⁵ C ₀₃	
	0,01	7,39 C ₀₃	83,6 C ₀₃	e ^{82,6} C ₀₃	
	0,1	4,1 C ₀₃	8,36 C ₀₃	1,6 10³ C ₀₃	
	0,25	2,74 C ₀₃	3,34 C ₀₃	10,4 C ₀₃	
	0,5	1,74 C ₀₃	1,67 C ₀₃	2 C ₀₃	
	0,7	1,26 C ₀₃	1,194 C ₀₃	1,214 C ₀₃	

$$(F_i)^{N_i}/N_i! = F_m; i = 1, 2, 3.$$

Стоимость разработки такой СЖО с использованием обратно пропорциональной модели (для примера) равна

$$C_i = N_i C_{0i} \left(F_{0i} / F_i \right),$$

где C_{0i} — стоимость разработки базовой СЖО i-го варианта.

Тогда поставленная задача сводится к следующей задаче оптимизации по 2 связанным параметрам F_i и N_i :

$$C_{i} = N_{i}C_{0i}\left(F_{0i}/F_{i}\right) \xrightarrow{F_{i},N_{i}} min;$$

$$\left(F_{i}\right)^{N_{i}}/N_{i}! \le F_{m}, i = 1, 2, 3;$$

$$F_{i} \le F_{0i}$$
(2)

Графическая интерпретация решения задачи (2) представлена на рис. 1—3 для 3 вариантов регенерационных СЖО соответственно. Из расчетов и рис. 1, 3 видно, что для комбинированной и максимально замкнутой СЖО предварительное усовершенствования систем с повышением надежности не дает снижения их стоимости. Минимальную стоимость разработки имеют базовые комбинированная СЖО с 4-кратным резервированием и максимально замкнутая СЖО с 6-кратным резервированием.

Для частично замкнутой СЖО (см. рис. 2) оптимальным решением является ее предварительное усовершенствование и доведение вероятности отказов за T=1000 сут от величины $F_{02}=0.7$ до $F_2=0.654$ и 5-кратное ненагруженное резервирование. Экономия стоимости производства такой системы составляет $6C_{02}$ -5,35· $C_{02}=0.65$ · C_{02} . Видно, что снижение стоимости небольшое, хотя кратность резервирования уменьшилась на 1.

В результате можно сделать вывод, что предварительное повышение надежности базовых вариантов

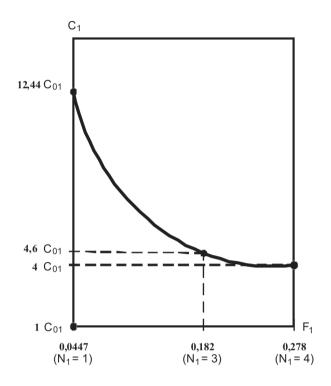


Рис. 1. Зависимость стоимости усовершенствованной комбинированной СЖО от вероятности отказов F_1 за T=1000 сут при различных кратностях резервирования N,

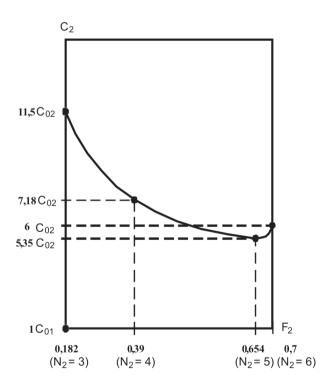


Рис. 2. Зависимость стоимости усовершенствованной частично замкнутой СЖО от вероятности отказов F_2 за T=1000 сут при различных кратностях резервирования N_2

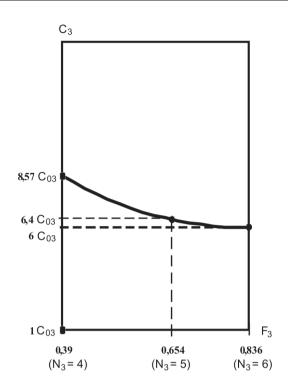


Рис. 3. Зависимость стоимости максимально замкнутой СЖО от вероятности отказов F_3 за T=1000 сут при различных кратностях резервирования N_2

регенерационных СЖО с последующим общим резервированием не дает или дает небольшое снижение стоимости разработки СЖО, что объясняется высокими стоимостными затратами на повышение базовой надежности.

Для дальнейшего снижения стоимости, массы и кратности резервирования рассмотрим раздельное ненагруженное резервирование подсистем регенерации СЖО.

Раздельное ненагруженное резервирование базовых подсистем регенерации СЖО

Считаем, что каждый вариант СЖО состоит из $m_{i'}$ (i=1,2,3) последовательно соединенных (в смысле надежности) подсистем регенерации продуктов среды обитания, для каждой из которых вводится n_i — ненагруженный резерв, как показано на рис. 4. Для комбинированной СЖО $m_1=2$, для частично замкнутой СЖО $m_2=5$, для максимально замкнутой СЖО $m_6=6$. Каждая подсистема характеризуется вероятностью безотказной работы $P_{ki}(t)$ и вероятностью отказа $F_{ki}(t)=1$ - $P_{ki}(t)$, где ki — номер подсистемы в i-м варианте СЖО; $k=1,...m_i$; i=1,2,3.

Тогда вероятность безотказной работы k_i -й подсистемы в i-м варианте СЖО с учетом n_i — кратности ненагруженного резервирования составляет

$$P_{ki,res}(t) = 1 - (F_{ki}(t))^{n_i} / n_i!,$$

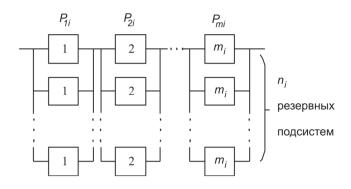


Рис. 4. Схема раздельного резервирования СЖО

а вероятность безотказной работы всей СЖО *i-*го варианта равна

$$P_{i}(t) = \prod_{k=1}^{m_{i}} P_{ki,res}(t) = \prod_{k=1}^{m_{i}} \left[1 - \left(F_{ki}(t) \right)^{n_{i}} / n_{i}! \right].$$
 (3)

Вероятности отказов всех подсистем регенерации базовых вариантов СЖО при T=1000 сут в соответствии с табл. 1 равны $F_{ki}=0,139;\ k=1,...,$ mi; i=1,2,3. Необходимые значения кратности ненагруженного резервирования пі находим с помощью выражения (3) при t=T=1000 сут; $P_i(t)=0,999;$ i=1,2,3, решая следующие 3 задачи:

$$\prod_{k=1}^{m_i} \left[1 - \left(F_{ki}(T) \right)^{n_i} / n_i! \right] \ge 0,999; i = 1,2,3,$$

где n_i – целые положительные числа.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таким образом, при раздельном способе ненагруженного резервирования подсистем СЖО получены самые высокие показатели надежности. По сравнению с общим ненагруженным резервированием снижается кратность резервирования для комбинированной СЖО на 1, для частично и максимально замкнутых СЖО на 2; стоимость производства и масса СЖО снижаются на 25, 66 и 66 % для 3 вариантов СЖО соответственно.

Выводы

- 1. Проведены анализ и прогноз стоимости следующих способов обеспечения высокой надежности регенерационных СЖО на уровне $P_m = 0,999$ на время T = 1000 сут автономного полета:
- усовершенствование базовых вариантов СЖО и доведение их надежности до уровня P_m ;
- общее ненагруженное резервирование базовых СЖО;
- общее ненагруженное резервирование усовершенствованных СЖО;
- раздельное ненагруженное резервирование базовых подсистем регенерации СЖО.
- В качестве базовых рассмотрены 3 типовых варианта СЖО: комбинированная СЖО, частично замкнутая СЖО и максимально замкнутая СЖО, имеющих характеристики физико-химических СЖО, применяемых в российском сегменте МКС.
- 2. Усовершенствование базовых вариантов СЖО и доведение их надежности до уровней от 0,9 до 0,999 на 1000 сут полета нецелесообразно из-за чрезмерно больших затрат на разработку, которые были оценены по 3 моделям «стоимость надежность»: логарифмической, обратно пропорциональной и экспоненциальной. Оправданным является уменьшение вероятности отказов базовых вариантов СЖО не более чем в 3 раза, что приведет к увеличению стоимости разработки в 3—6 раз.
- 3. Общее ненагруженное резервирование базовых вариантов СЖО требует значительного увеличения стоимости разработки и массы: в 4 раза для комбинированной СЖО и в 6 раз для частично и максимально замкнутых СЖО.
- 4. Предварительное усовершенствование с повышением надежности базовых вариантов СЖО с последующим общим резервированием:
- для частично замкнутой СЖО дает снижение кратности резервирования на 1 при уменьшении ее вероятности отказов до 0,65 за T=1000 сут, что приводит к экономии стоимости разработки одной базовой СЖО на 65 %;
- для комбинированной и максимально замкнутой СЖО не приводит к снижению кратности общего резервирования, что объясняется высокими

Таблица 3

Результаты раздельного	ненагруженного	резервирования	і базовых подсистем	регенерации СЖО
. commendation passessioner	menar pymennor o	peseparipobaririr	· oasobbix iioponeieii	per erreparting erre

i	Вариант СЖО	Количество подсистем регенерации m_i	Требуемая кратность резервирования n_i	Стоимость СЖО $C_i = C_{0i} n_i$
1	Комбинированная	2	3	3 C ₀₁
2	Частично замкнутая	5	4	4 C ₀₂
3	Максимально замкнутая	6	4	4 C ₀₃

стоимостными затратами на повышение базовой надежности.

5. При раздельном способе ненагруженного резервирования подсистем СЖО получены самые высокие показатели надежности. По сравнению с общим ненагруженным резервированием снижается кратность резервирования для комбинированной СЖО на 1, для частично и максимально замкнутых СЖО на 2; стоимость производства и масса СЖО снижаются на 25, 66 и 66 % для 3 вариантов СЖО соответственно.

Список литературы

1. Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А. и др. Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 57–74.

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

- 2. Бобе Л.С., Самсонов Н.М., Новиков В.М. и др. Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций // Там же. 2009. № 1. С. 69–78.
- Bobe L.S., Samsonov N.M., Novikov V.M. et al. Prospects of development of manned space water regeneration systems // Ibid. 2009. № 1. P. 69–78.
- 3. Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А. и др. Проблемы жизнеобеспечения длительных космических экспедиций // Авиакосм. и экол. мед. 2008. Т. 42. № 6–1. С. 13–16.

Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A. et al. Problems of life supports for crews on long-duration space missions // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2008. V. 42. N_{2} 6–1. P. 13–16.

- 4. 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. \mathbb{N}^{9} 1. P. 17–24.
- 5. Surdik R.J., Robert C. Morrow, John P. Wetzel. Life support multidimensional assessment criteria // ICES-2017-306, 47th Int. conf. on environmental systems (ISES), 16–20 July 2017, Charleston, South Carolina.
- 6. Jones H.W. Life support goals including high closure and low mass should be reconsidered using system analysis // ICES-2017-91, 47th Int. conf. on environmental systems (ISES), 16–20 July 2017, Charleston, South Carolina.
- 7. Lange K.E., Anderson M.S. Reliability impacts in life support architecture and technology selection // AIAA-2012-3491, 42nd Int. conf. on environmental systems (ICES), 15–19 July 2012, San Diego, California.

- 8. Jones H.W. Design and analysis of a flexible, reliable deep space life support system // AIAA-2012-3418, 42nd Int. conf. on environmental systems (ICES), 15–19 July 2012, San Diego, California.
- 9. Jones H.W. Diverse redundant systems for reliable space life support // ICES-2015-047, 45th Int. conf. on environmental systems (ICES), 12–16 July 2015, Bellevue, Washington.
- 10. Jones H.W. Methods and costs to achieve ultra reliable life support // AIAA 2012-3618, 42nd Int. conf. on environmental systems, 15–19 July 2012, San Diego, California.
- 11. *Рожнов В.Ф.* Космические системы жизнеобеспечения. М., 2009.

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

12. Кудрявцева Н.С. Анализ показателей надежности и эквивалентной массы систем жизнеобеспечения для полетов в дальний космос // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53. № 3. С. 5—12.

Kudryavtseva N.S. Analysis of reliability and equivalent mass metrics of life support systems for deep-space missions // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2019. V. 3. \mathbb{N}° 3. P. 5–12.

13. Сальников Н.А., Бобе Л.С., Кочетков А.А., Синяк Ю.Е. Регенерация санитарно-гигиенической воды на перспективных космических станциях // Там же. 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 // Ibid. 2017. V. 51. № 5. P. 47–54.

- 14. 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. 2008. Т. 42. N° 6–1. С. 74–76.
- Bobe L.S., Soloukhin V.A., Borovikova G.S. and et al. Operation of the system of water reclamation from atmospheric condensate (SRV-R2M) on the International space station: Prospect of development // Ibid. 2008. V. 42. N° 6–1. P. 74–76.
- 15. 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.
- 16. 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.

17. Do S., Ho K., Schreiner S. et al. An independent assessment of the technical feasibility of the Mars one mission plan – updated analysis // Acta Astronaut. 2016. Nº 120. P. 192–228.

18. *Хачатрян С.А., Киборт А.Н*. Выбор оптимального способа повышения надежности невосстанавливаемых объектов // Проблемы современной науки и образования. 2015. № 12 (42). С. 63–66.

Khachatryan S.A., Kibort A.N. Choosing the optimal approach to improve the reliability of non-recoverable objects // Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya. 2015. № 12 (42). P. 63–66.

Поступила 22.11.2019

COMPARATIVE RELIABILITY ASSESSMENT AND COSTING OF LIFE SUPPORT SYSTEMS FOR EXTENDED INTERPLANETARY MISSIONS

Kudryavtseva N.S., Sorokin A.E.

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Analysis and comparison of various approaches to attaining high robustness of space life support systems (LSSs) as well as R&D preliminary coasting were performed with reference to a 1000-day mission beyond Earth's and Moon orbits. Robustness is defined by the probability of crew loss, while cost takes into account that probability of LSSs failure in this category of mission must be equal to 0.001. We considered 3 standard designs of physicochemical regenerative LSSs differing in the degree of closure: combined, partially closed and closed as fully as possible.

It was found that updating the basic life support designs and raising their robustness up to the level required for the 1000-d operation would be too costly and, therefore, unpractical. The whole-system cold redundancy would increase the engineering design costs and mass by a factor of 4 and 6 of combined and partially and fully closed LSSs, respectively.

The minimum-cost engineering design and lowest mass can be provided by setting cold redundancy for individual regeneration subsystems. Then the redundancy rate of combined LSS will be reduced by a unit and of partially and fully closed life support by two units in comparison with the whole-system redundancy.

Key words: lifer support system, crew loss probability, costs.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 30–37.

УДК 576.54

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭФФЕКТОВ МОДЕЛИРУЕМОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ ПРИ СОКУЛЬТИВИРОВАНИИ ГЕМОПОЭТИЧЕСКИХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ И МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТРОМАЛЬНЫХ КЛЕТОК

Голикова Е.А., Андрианова И.В., Буравкова Л.Б.

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

E-mail: eagolikovamsu@gmail.com

Совместное культивирование мезенхимальных стромальных клеток (МСК) и гемопоэтических стволовых и прогениторных клеток (ГСПК) широко используется для изучения ранних стадий кроветворения, экспансии CD34+-клеток, влияния различных факторов на миелопоэз. Известно, что анемия, наблюдаемая при космических полетах, может быть опосредована изменениями физиологии гемопоэтических предшественников. Для изучения эффектов моделируемой микрогравитации адаптировали модель сокультивирования гемопоэтических предшественников с мезенхимальными стромальными клетками. Для этого проанализировали количество и колониеобразующую активность суспензионных ГСПК, а также фракцию МСК-ассоциированных ГСПК по образованию в культуре областей «булыжной мостовой» при использовании в качестве фидерного подслоя пролиферирующих и митотически неактивных МСК. Показано, что модификация протокола сокультивирования МСК и ГСПК, необходимая для проведения экспериментов по изучению эффектов моделируемой микрогравитации, не повлияла на эффективность экспансии ГСПК при использовании как делящихся, так и митотически неактивных МСК в качестве подслоя.

Ключевые слова: мононуклеарные клетки пуповинной крови, мезенхимальные стромальные клетки, суспензионные гемопоэтические стволовые и прогениторные клетки, МСК-ассоциированные гемопоэтические стволовые и прогениторные клетки, сокультивирование, митомицин С.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 38-44.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-38-44

Феномен «космической анемии» часто наблюдается после длительных космических полетов [1–3]. Известно, что микрогравитация может оказывать непосредственное влияние на гемопоэз іп vivo на уровне пролиферации и дифференцировки ранних примитивных гемопоэтических клеток-предшественников, и это может быть существенным компонентом клинического синдрома «космической анемии» [4]. Показано, что при длительном космическом полете наблюдается угнетение эритроидного и стимуляция гранулоцитарного ростков кроветворения, а также увеличение количества недифференцированных

предшественников [5], однако механизмы этого явления до сих пор неизвестны.

Эксперименты на клеточных культурах при моделировании микрогравитации могут дать возможность уточнить механизмы дифференцировки гемопоэтических стволовых клеток (ГСК). Изучение этого вопроса требует создания и отработки подходящей модели. В физиологических условиях ГСК находятся в нише не изолированно, а в контакте с компонентами стромы. Поэтому большое значение в экспериментах, посвященных исследованию ГСК и гемопоэза, имеет создание микроокружения, близкого естественному [6, 7]. Особая роль в создании гемопоэзиндуцирующего микроокружения принадлежит мезенхимальным стромальным клеткам (МСК), которые могут влиять на гемопоэтические стволовые и прогениторные клетки (ГСПК), изменяя соотношение коммитированных и малодифференцированных предшественников, обеспечивающих длительное восстановление кроветворения [8–10].

Для экспансии гемопоэтических предшественников используются разнообразные стратегии культивирования, включая использование мононуклеарных клеток пуповинной крови (пкМНК), селективной CD34+/CD133+-фракции, различных комбинаций цитокинов и ростовых факторов, культивирование со стромальными клетками [11, 12, 13]. Нами была выбрана модель сокультивирования пкМНК, включающая ГСПК, и МСК из жировой ткани с последующей экспансией ГСПК [14]. Для стромального подслоя используются либо делящиеся МСК [15], либо митотически неактивные МСК, полученные обработкой митомицином [16, 17] или облучением. Эта культуральная система представляет собой экспериментально доступную модель ранних стадий кроветворения, однако для изучения влияния микрогравитации на гемопоэз она должна быть оптимизирована с учетом использования в этих исследованиях 3D-клиностата.

Для моделирования эффектов микрогравитации in vitro используется прибор для рандомизации положения объекта относительно вектора гравитации. Это происходит за счет разнонаправленного вращения двух взаимно перпендикулярных рамок, к которым

крепится платформа с экспериментальными образцами. При этом не изменяется направление вектора гравитации, но имитируется эффект снижения влияния силы тяжести на культуру клеток [18]. Постоянное вращение экспериментальной культуры требует модификации уже существующей и используемой нами модели. В частности, в отличие от описанного в работах протокола [15, 16], необходимо использование не чашек Петри, а культуральных флаконов, полностью заполненных средой. В связи с этим также необходимо проверить способность стромального подслоя удерживаться на дне культурального флакона.

Целью работы является адаптация модели сокультивирования МСК и ГСПК для дальнейшего анализа моделированных эффектов микрогравитации на гемопоэз.

Методика

Источники МСК и гемопоэтических прогениторных клеток

МСК выделяли из стромально-васкулярной фракции жировой ткани здоровых доноров по описанной ранее методике [19] с некоторыми модификациями [20]. Образцы жировой ткани были предоставлены в рамках научного соглашения многопрофильной медицинской клиникой «Союз». Протоколы экспериментов были одобрены Комитетом по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Для ферментативной дезинтеграции образцы ткани обрабатывали 0,075%-ным раствором коллагеназы IA (Sigma-Aldrich, США). После промывания клетки ресуспендировали в ростовой среде aMEM (Gibco, Life Technologies, Thermo Fisher Scientific, США), с добавлением 10%-ной фетальной бычьей сыворотки (Hyclone, GE Healthcare Life Sciences, США), 5 мг/мл стрептомицина, 5 ед./мл пенициллина и 2 мМ глутамина (MP Biomedicals, США). Сразу после выделения МСК помещали в мультигазовый CO_2 -инкубатор (Sanyo) (5% O_2 , 5% CO₂, 90% N₂ – «физиологическая» гипоксия). После достижения 70-80 % конфлюентности монослоя клетки пассировали и в экспериментах использовали МСК 2-4 пассажей.

Криоконсервированные образцы пкМНК были предоставлены банком стволовых клеток «Криоцентр» (Москва) в рамках научного соглашения. В день эксперимента клетки размораживали на водяной бане при +37 °С и отмывали от криопротектора в избытке среды культивирования. Определение жизнеспособности клеток проводили окрашиванием трипановым синим. После этого концентрацию клеток доводили до 1,5–2,5 х 106 клеток/мл в полной ростовой среде и использовали в течение 30 мин. Для пкМНК при совместном культивировании с МСК использовали среду RPMI 1640 (Gibco, Life Technologies, Thermo Fisher Scientific, США), с добавлением 2 мМ L-глутамина (МР Biomedicals, США), раствора

пенициллин-стрептомицина (100 ед./мл) и инактивированной 10%-ной фетальной бычьей сыворотки.

Схема исследования

В эксперименте в качестве фидерного подслоя использовали как пролиферирующие, так и митотически неактивные МСК. Во втором случае с целью остановки деления за день до проведения эксперимента МСК инкубировали в течение 18 ч в присутствии митомицина С (1,5 мкг/мл) (Sigma-Aldrich, США). Культуры тщательно промывали фосфатно-солевым буфером (ФСБ), трипсинизировали и пересевали в чашки Петри диаметром 35 мм (Corning Incorporated-Life Sciences, Нью-Йорк, США) и слайд-флаконы с поверхностью культивирования 9 см² (Lab-Tek, Nunc, Дания) с плотностью 6 х 10³ клеток/см² для пролиферирующих МСК и с плотностью, соответствующей 70-80 % конфлюентности для митотически неактивных МСК (рис. 1). Дальнейшие эксперименты проводили при 20%-ном О₂.

При 70–80 % конфлюентности монослоя МСК вносили суспензию пкМНК в количестве $1,5-2,5 \times 10^6$ клеток/мл, а затем культивировали совместно в течение 72 ч в $\mathrm{CO_2}$ -инкубаторе в 20%-ном $\mathrm{O_2}$. После этого неадгезированные клетки удаляли, а адгезированные к МСК пкМНК продолжали культивировать в течение 4 дней при тех же условиях. Дальнейшее сокультивирование проводили в полностью заполненных средой закрытых слайд-флаконах, в чашках Петри диаметром 35 мм с 3 мл среды и в слайд-флаконах с 3 мл среды.

Проводили анализ плавающих в суспензии и адгезированных к стромальным клеткам ГСПК с помощью микроскопа Nikon Eclipse TiU (Nikon, Япония). Определяли количество суспензионных ГСПК, оценивали наличие колониеобразующих единиц (КОЕ) различных гемопоэтических ростков по способности клеток образовывать колонии в полужидкой среде, содержащей коктейль цитокинов и факторов pocτa ΓCΠK (MethoCult H4034, StemCell Technologies, Канада) в соответствии с протоколом производителя. 50×10^3 ГСПК смешивали со средой MethoCult и смесь распределяли в 35-мм чашки Петри. Подсчет колоний проводили на 14-й день культивирования. Для количественной оценки колоний в полужидкой среде использовали проходящий свет, для морфологического анализа колоний в полужидкой среде применяли темное поле, а регистрацию образования суспензии клеток проводили с помощью фазово-контрастной микроскопии.

Для анализа фракции МСК-ассоциированных клеток стекла с клетками фиксировали ледяным метанолом в течение 5 мин и окрашивали по Гимза (AppliChem, Германия) в соответствии с инструкцией производителя. Наличие некоммитированных гемопоэтических предшественников, образующих области «булыжника» (КООБ), выявляли по образованию

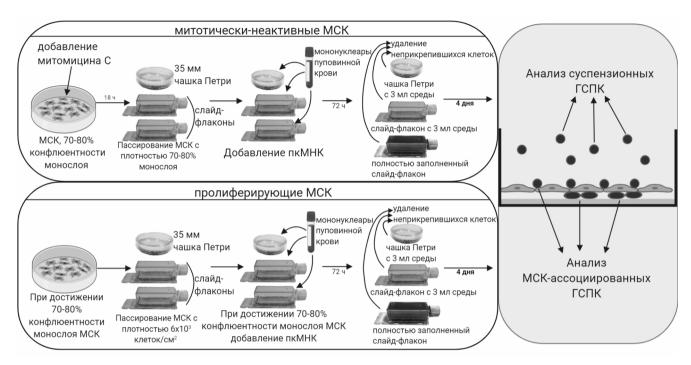


Рис. 1. Схема эксперимента для оценки возможности использования системы сокультивирования МСК и ГСПК на 3D-клиностате.

Создана с помощью графического онлайн-редактора Biorender.com

в культуре областей «булыжной мостовой», которые обнаруживали с помощью фазово-контрастной микроскопии.

Статистический анализ

Статистический анализ полученных данных выполняли с помощью программы GraphPad Prism 7.0 (GraphPad Software, США), используя непараметрический критерий Манна — Уитни. Различия считались статистически значимыми при р < 0.05.

Результаты и обсуждение

Известно, что при совместном культивировании со стромальными клетками гемопоэтические клетки занимают различные «ниши», что позволяет выделить несколько фракций. Часть гемопоэтических

предшественников находится над фидерным подслоем в суспензии (суспензионные ГСПК), другие адгезируют к стромальным клеткам или мигрируют под монослой стромальных клеток (МСКассоциированные ГСПК) [21]. Соотношение клеточных фракций гемопоэтических предшественников, обладающих разным пролиферативным потенциалом, зависит от содержания кислорода [21, 22].

В данном исследовании изучались как суспензионные, так и МСК-ассоциированные гемопоэтические предшественники. Суспензионные ГСПК выглядели как маленькие округлые яркие клетки при фазово-контрастной микроскопии. Их количество не зависело от использования в качестве фидерного подслоя пролиферирующих или митотически неактивных МСК и имело тенденцию к повышению при увеличении объема культуральной среды (таблица).

Таблица

Количество суспензионных ГСПК и «областей булыжника», образованных МСК-ассоциированными клетками (М \pm σ , n = 3)

MCK		Полный слайд-флакон	Слайд-флакон с 3 мл среды	35-мм чашка Петри
Пролиферирующие	Количество суспензионных клеток, см ²	2037 ± 321	2111 ± 128	1375 ± 144
MCK	Общее количество «областей булыжника», см²	135 ± 48	136 ± 17	72 ± 11
Митотически	Количество суспензионных клеток, см ²	2167 ± 79	1222 ± 157	1438 ± 236
неактивные МСК	Общее количество «областей булыжника», см²	89 ± 25	91 ± 37	37 ± 13

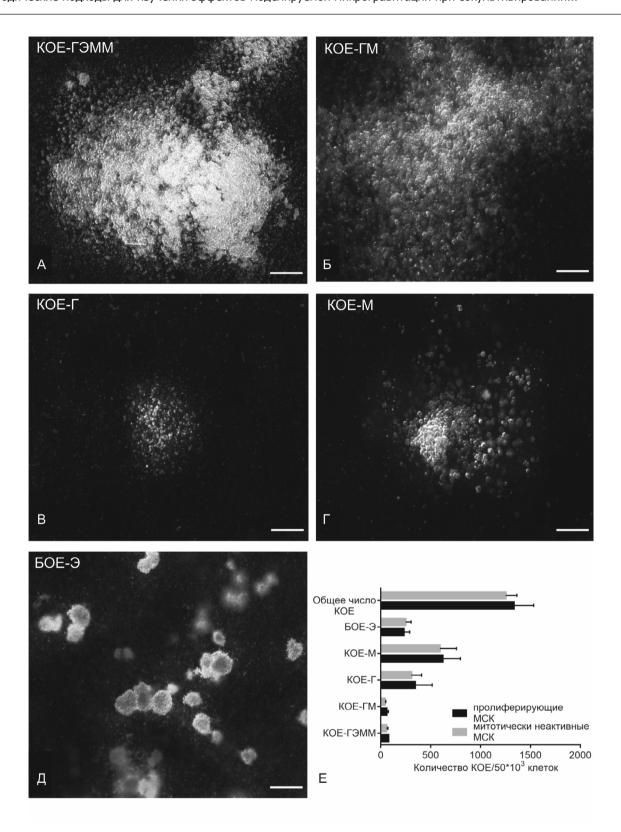


Рис. 2. Колониеобразующие единицы, образованные ГСПК в полужидкой среде MethoCult после 4 сут сокультивирования с МСК: А – гемопоэтические колонии, образованные от КОЕ-гранулоцитов, эритроцитов, моноцитов/макрофагов, мегакариоцитов (КОЕ-ГЭММ); Б – КОЕ-гранулоцитов, моноцитов/макрофагов (КОЕ-ГМ); В – КОЕ-гранулоцитов (КОЕ-Г); Γ – КОЕ-моноцитов/макрофагов (КОЕ-М); Γ – бурстобразующих единиц эритроцитов (БОЕ-Э); Γ – количество гемопоэтических колоний на 50 000 клеток при сокультивировании ГСПК с пролиферирующими и митотически неактивными МСК.

Темное поле, масштабный отрезок 100 мкм.

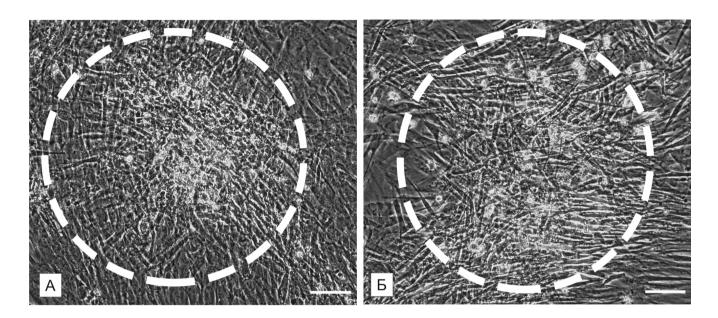


Рис. 3. МСК-ассоциированные ГСПК в сокультуре с МСК после 4 сут экспансии. Использование в качестве подслоя пролиферирующих МСК (A) или митотически неактивных МСК (Б); белой пунктирной линией выделены области «булыжной мостовой»; фазовый контраст, масштабный отрезок 100 мкм

Функциональную активность суспензионных ГСПК оценивали с помощью клоногенного анализа, который позволяет идентифицировать клетки-предшественники с различным направлением коммитированности. В среде на основе метилцеллюлозы (MethoCult), созданной для обеспечения оптимального роста и дифференцировки гемопоэтических клеток-предшественников, получены КОЕ различных гемопоэтических ростков (рис. 2, А-Д). Анализ суспензионных ГСПК после их культивирования в полужидкой среде MethoCult H4034 не выявил существенных отличий общего количества образующихся колоний в случае использования делящихся или митотически неактивных МСК в качестве подслоя (см. рис. 2, Е).

МСК-ассоциированные ГСПК присутствовали как на поверхности МСК, так и под фидерным слоем. Среди субпопуляции ГСПК, расположенной над МСК, различали маленькие круглые клетки размером 10-15 мкм, а под МСК - крупные плоские клетки размером 20-40 мкм, которые располагались отдельно или в группах. Через 4 сут сокультивирования в пространстве под МСК формировались кластеры КООБ и наблюдалось формирование областей «булыжной мостовой» (рис. 3, A, Б). Считается, что клетки, которые образуют данные области, являются примитивными ГСПК, способными к длительному поддержанию кроветворения in vivo [23]. Выявление этих клеток в гемопоэтических культурах является распространенным методом, позволяющим оценить долю активно пролиферирующих ранних гемопоэтических предшественников in vitro. При подсчете обнаружено, что количество КООБ существенно не

отличалось в случае использования в качестве подслоя делящихся МСК по сравнению с митотически неактивными МСК (см. табл.).

Таким образом, сравнительное исследование амплификации ГСПК in vitro на стромальном подслое показало идентичность результатов при использовании полностью заполненных флаконов, флаконов с 3 мл среды и чашек Петри. Это позволит использовать модифицированный протокол сокультивирования МСК и ГСПК для изучения моделированных эффектов микрогравитации на гемопоэз.

Выводы

- 1. Для исследования межклеточного взаимодействия ГСПК со стромальным подслоем могут быть использованы как делящиеся, так и митотически неактивные МСК. Остановка деления клеток стромального подслоя с помощью митомицина С не влияет на способность ГСПК к адгезии и пролиферации.
- 2. Сокультивирование ГСПК на пролиферирующих и митотически неактивных МСК, а также увеличение объема среды культивирования позволяют получить одинаковое количество суспензионных ГСПК со сходным потенциалом дифференцировки и использовать адаптированную модель при анализе моделированных эффектов микрогравитации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N° 19-29-04026.

Список литературы

- 1. Alfrey C.P., Udden M.M., Leach-Huntoon C. et al. Control of red blood cell mass in spaceflight // J. of Applied Physiol. 1996. V. 81. Nº 1. P. 98–104.
- 2. De Santo N.G., Cirillo M., Kirsch K.A. et al. Anemia and erythropoietin in space flights // Seminars in Nephrology. 2005. V. 25. № 6. P. 379–387.
- 3. Zou L.X., Cui S.Y., Zhong J. et al. Simulated microgravity induce apoptosis and down-regulation of erythropoietin receptor of UT-7/EPO cells // Adv. in Space Res. 2010. V. 46. № 10. P. 1237–1244.
- 4. Davis T.A., Wiesmann W., Kidwell W. et al. Effect of spaceflight on human stem cell hematopoiesis: suppression of erythropoiesis and myelopoiesis // J. of Leukocyte Biol. 1996. V. 60. № 1. P. 69–76.
- 5. Udden M.M., Driscoll T.B., Pickett M.H. et al. Decreased production of red blood cells in human subjects exposed to microgravity // The J. of Laboratory and Clinical Med. 1995. V. 125. № 4. P. 442–449.
- 6. *Klamer S., Voermans C.* The role of novel and known extracellular matrix and adhesion molecules in the homeostatic and regenerative bone marrow microenvironment // Cell Adhesion & Migration. 2014. V. 8. № 6. P. 563–577.
- 7. Jing D., Fonseca A.V., Alakel N. et al. Hematopoietic stem cells in co-culture with mesenchymal stromal cellsmodeling the niche compartments in vitro // Haematologica. 2010. V. 95. № 4. P. 542–550.
- 8. *Punzel M., Liu D., Zhang T. et al.* The symmetry of initial divisions of human hematopoietic progenitors is altered only by the cellular microenvironment // Exper. Hematol. 2003. V. 31. № 4. P. 339–347.
- 9. Wagner W., Wein F., Roderburg C. et al. Adhesion of hematopoietic progenitor cells to human mesenchymal stem cells as a model for cell-cell interaction // Ibid. 2007. V. 35. № 2. P. 314–325.
- 10. De Toni F., Poglio S., Youcef A.B. et al. Human adiposederived stromal cells efficiently support hematopoiesis in vitro and in vivo: a key step for therapeutic studies // Stem Cells and Develop. 2011. V. 20. № 12. P. 2127–2138.
- 11. Сотнезова Е.В., Андреева Е.Р., Григорьев А.И., Буравкова Л.Б. Экспансия гемопоэтических стволовых и прогениторных клеток пуповинной крови ех vivo // Acta Naturae (рус. версия). 2016. Т. 8. № 3 (30). С. 6–16.

Sotnezova E.V., Andreeva E.R., Grigoriev A.I., Buravkova L.B. Ex vivo expansion of hematopoietic stem and progenitor cells from umbilical cord blood // Acta Naturae. 2016. V. 8. № 3 (30). P. 6–16.

12. Уфимцева А.И., Канов Е.В. Характеристика и ех vivo экспансия гемопоэтических стволовых и прогениторных клеток пуповинной крови // Гены и клетки. 2012. Т. 7. \mathbb{N}^9 4. С. 21–27.

Ufimtceva A.I., Kanov E.V. Characterization and ex vivo expansion umbilical cord blood hematopoietic stem and progenitor cells // Geny i kletki. 2012. V. 7. № 4. P. 21–27.

13. *Шаманская Т.В., Осипова Е.Ю., Румянцев С.А.* Ex vivo экспансия гемопоэтических стволовых клеток

пуповинной крови (обзор литературы) // Онкогематология. 2012. Т. 7. \mathbb{N} 1. С. 35–45.

Shamanskaya T.V., Osipova E.Yu., Roumiantsev S.A. Umbilical cord bloods hematopoietic stem cells ex vivo expansion (the literature review) // Onkogematologia. 2012. V. 7. \mathbb{N}^{0} 1. P. 35–45.

14. *Маслова Е.В., Андреева Е.Р., Андрианова И.В.* Обогащение мононуклеаров пуповинной крови гемопоэтическими предшественниками при сокультивировании с мезенхимальными стромальными клеткми их жировой ткани // Бюллетень эксперим. биологии и медицины. 2014. Т. 156. № 4. С. 584–589.

Maslova E.V., Andreeva E.R., Andrianova I.V. Enrichment of umbilical cord blood mononuclears with hemopoietic precursors in co-culture with mesenchymal stromal cells from human adipose tissue // Buylletin of eksperimental'noy bioloii i meditsiny. 2014. V. 156. Nº 4. P. 584–589.

- 15. Andreeva E.R., Andrianova I.V., Gornostaeva A.N. et al. Evaluation of committed and primitive cord blood progenitors after expansion on adipose stromal cells // Cell and Tissue Res. 2018. V. 372. \mathbb{N}^9 3. P. 523–533.
- 16. Andreeva E.R., Andrianova I.V., Sotnezova E.V. et al. Human adipose-tissue derived stromal cells in combination with hypoxia effectively support ex vivo expansion of cord blood haematopoietic progenitors // PloS One. 2015. V. 10. No. 4.
- 17. Andreeva E.R., Andrianova I.V., Sotnezova E.V. et al. Hematopoiesis-supportive function of growth-arrested human adipose-tissue stromal cells under physiological hypoxia // J. of Biosci. and Bioengineering. 2019. V. 127. \mathbb{N}° 5. P. 647–654.
- 18. Van Loon J.J. Some history and use of the random positioning machine, RPM, in gravity related research // Adv. in Space Res. 2007. V. 39. N° 7. P. 1161–1165.
- 19. Zuk P.A., Zhu M.I.N., Mizuno H. et al. Multilineage cells from human adipose tissue: implications for cell-based therapies // Tissue Engineering. 2001. V. 7. № 2. P. 211–228.
- 20. Buravkova L.B., Grinakovskaya O.S., Andreeva E.R. et al. Characteristics of human lipoaspirate-isolated mesenchymal stromal cells cultivated under lower oxygen tension // Cell and Tissue Biol. 2009. V. 3. № 1. P. 23–28.
- 21. Dexter T.M., Allen T.D., Lajtha L.G. Conditions controlling the proliferation of haemopoietic stem cells in vitro // J. of Cellular Physiol. 1977. V. 91. N° 3. P. 335–344.
- 22. *Jing D., Wobus M., Poitz D.M. et al.* Oxygen tension plays a critical role in the hematopoietic microenvironment in vitro // Haematologica. 2012. V. 97. Nº 3. P. 331–339.
- 23. Ploemacher R.E., van der Sluijs J.P., Voerman J.S., Brons N.H. An in vitro limiting-dilution assay of long-term repopulating hematopoietic stem cells in the mouse // Blood. 1989. V. 74. \mathbb{N}° 8. P. 2755–2763.

Поступила 24.12.2019

APPROACHES TO STUDYING THE EFFECTS OF SIMULATED MICROGRAVITY IN CO-CULTURE OF HEMOPOIETIC PROGENITORS AND MESENCHYMAL STROMAL CELLS

Golikova E.A., Andrianova I.V., Buravkova L.B.

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

Co-culture of mesenchymal stromal cells (MSCs) with hemopoietic stem/progenitor cells (HSPCs) is broadly used to studying the early steps of hematopoiesis, CD34+-cell expansion, and the impact of different factors on myelopoiesis. It is well known that anemia developing in space missions can be mediated by the changes of physiological of hemopoietic

progenitors (HSPCs). The effects of simulated microgravity were investigated in a modified model of hemopoietuc progenitors' co-culture with MSCs. The number and colonyforming activity of floating HSPCs were analyzed. The cobblestone-like areas of the MSC-associated HSPC fraction on a feeder consisting of proliferating and mitotically inactive MSCs were characterized as well. The use of the modified protocol requested by the microgravity simulation did not impact the HSPCs expansion on either proliferating or mitotically inactive MSCs as feeder.

Key words: mononucleated cells from umbilical blood, mesenchymal stromal cells, floating hemopoietic stem/ progenitor cells, MSCs-associated hemopoietic stem/ progenitor cells, co-culture, mitomycin C.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 38–44.

УДК 159.9:629.7, 629.78.07:159.9

ИЗУЧЕНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИРУЕМОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ МЕТОДОМ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧИ

Лебедева С.А., Швед Д.М., Федяй С.О.

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

E-mail: sveta-firefox@yandex.ru

Работа посвящена изучению психофизиологического состояния человека-оператора, находящегося под воздействием моделируемых факторов космического полета. Впервые проведено комплексное исследование функционального состояния человека, пребывающего в течение 21 сут в условиях «сухой» иммерсии, с помощью анализа акустических характеристик речи в сопоставлении с психологическими и психофизиологическими методами и оценки когнитивной и сенсомоторной работоспособности. При изучении динамики речевых и когнитивных показателей на протяжении эксперимента выявлено наличие периодов адаптации обследуемых к иммерсионному воздействию. Установлены значимые связи между отдельными показателями речевого сигнала и результатами выполнения когнитивных и сенсомоторных задач.

Ключевые слова: анализ речи, сенсомоторная координация, когнитивные тесты, функциональное состояние, модельные эксперименты, микрогравитация, «сухая» иммерсия.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 45–51.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-45-51

В контексте возможности длительных полетов в дальний космос в настоящее время разрабатываются подходы к созданию систем психофизиологического сопровождения экипажа, отличающихся повышенной автономностью и малоинвазивностью. Такие методы позволили бы осуществлять непрерывный контроль состояния членов экипажа без вмешательства в их штатную деятельность и с минимальным включением в этот процесс наземных специалистов. Одним из методов, соответствующих данным критериям, является автоматизированный анализ психофизиологически релевантных характеристик речи операторов [1]. Ранее изучение акустических характеристик речи успешно проводилось в ряде модельных и космических экспериментов [2, 3], однако совершенствование технологической и методологической базы позволяет вывести данные исследования на новый уровень в рамках современного подхода, направленного в конечном итоге на обеспечение объективности анализа при снижении инвазивности психофизиологических методик.

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на функциональное состояние человека в космическом полете, является микрогравитация. Функциональные сдвиги (преимущественно негативные), развивающиеся под влиянием достаточно продолжительной гравитационной разгрузки, представляют собой сочетание как специфических изменений, обусловленных физической природой этого фактора, так и вторичных проявлений, связанных с последующими реакциями организма [4]. Однако в ряде исследований было показано, что само по себе длительное пребывание человека в условиях микрогравитации не сопровождается постоянными стрессорными реакциями в связи с существенными адаптивными резервами организма, которые также нуждаются в изучении [5]. Для исследования воздействия невесомости на функциональное состояние человека в настоящее время проводятся эксперименты на стенде «сухой» иммерсии, являющемся наиболее адекватной моделью микрогравитации [6].

Исследование изменений функционального состояния человека-оператора в условиях воздействия на него моделируемых факторов космического полета представляется целесообразным проводить в течение длительных отрезков времени. В таком случае изменения акустических характеристик речи будут сравниваться с нормой в контексте речевого поведения на протяжении суток, недель и т.д., что позволит с большей достоверностью оценивать динамику изменений функционального состояния и психических ресурсов обследуемых либо регистрировать развитие психической астенизации. Для данных целей использование модели 21-суточной «сухой» иммерсии представляется оптимальным как с точки зрения длительности, так и в контексте изучения влияния фактора микрогравитации на психофизиологическое состояние человека.

Методика

В рамках 21-суточного эксперимента на стенде «сухой» иммерсии в ГНЦ РФ – ИМБП РАН воспроизводились эффекты моделируемой микрогравитации,

длительной изоляции от привычного социального окружения и сенсорной депривации. В исследовании принимали участие 10 мужчин-добровольцев в возрасте от 21 года до 42 лет, подписавших Информированное согласие на участие в исследовании. Программа эксперимента была одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол \mathbb{N}° 483 от 3 августа 2018 г.).

Основным материалом для исследования являлись аудиозаписи речи испытателей, записываемые с помощью портативных диктофонов Zoom H1. Обследуемые записывали аудиоотчеты дважды в день (утром и вечером), в которых озвучивали свое самочувствие, настроение и сообщали о ночном сне или проведенном дне. Подобный формат аудиоотчетов частично воспроизводит ежедневные планировочные конференции (DPC), выполняемые космонавтами в начале и в конце рабочего дня.

Полученные аудиозаписи анализировались с помощью специализированного программного обеспечения Praat. В первую очередь для оценки использовались отрезки речи, унифицированные протоколом аудиоотчетов, для минимизации влияния варьирующего содержания (контента) высказываний. В динамике исследовались частота основного тона (ЧОТ, средняя и медианная), интенсивность (громкость) речи, количество биений тона речи, процент неозвученных речевых фрагментов (пауз) в речи, джиттер- и шиммер-эффекты (вариативность голоса по частоте и амплитуде) [7].

В исследовании применялись также психологические методики: опросник «Профиль настроений» POMS, методика «Тест цветовых выборов» (МЦВ) в модификации Л.Н. Собчик и тест STAI Спилбергера (оценка уровня ситуативной тревожности), которые выполнялись обследуемыми один раз в 5 сут [8–10]. Один раз в 3 сут обследуемые проходили диагностику, включающую батарею когнитивных тестов космического эксперимента (КЭ) «Пилот-Т», содержащую тесты на сенсомоторную координацию «РДО Координация» и «РДО Экстраполяция» и тест на выполнение простых математических операций [3]. Опросник Кейрси (методика оценки темперамента) обследуемые заполняли один раз до начала эксперимента [11]. Психофизиологическая методика «Стресс-диагностика», включающая тесты программно-аппаратного комплекса «БиоМышь» («Зеркальный координограф» и «Релаксометр»), и заполнение опросника совладания со стрессом СОРЕ выполнялись обследуемыми до и после 21-суточного иммерсионного воздействия [12].

Применявшиеся статистические методы включали в себя факторный анализ методом выделения главных компонент (метод вращения Варимакс с нормализацией Кайзера), корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона), сравнение средних 2 независимых выборок (t-критерий Вилкоксона).

Результаты и обсуждение

Результаты психодиагностических методик. В среднем показатели ситуативной тревожности, по данным теста STAI Спилбергера, находились в диапазоне низких значений у большинства обследуемых. При этом в начале иммерсионного воздействия, показатели тревожности повышались, достигая наибольшего уровня на 5-е сутки, и далее снижались до уровня фоновых измерений с выходом на плато (10-е и 20-е сутки эксперимента). Уровень тревожности достигал еще более низких значений в период последействия. Такая динамика тревожности соотносится с уровнем способности к произвольному расслаблению, измеряемой с помощью методики «Релаксометр». Показатели абсолютного и относительного изменения электрокожного сопротивления существенно снижались после окончания эксперимента, по сравнению с измерениями в фоне, что может быть связано с изменением лабильности нейровегетативной регуляции [13].

В ходе «сухой» иммерсии было обнаружено изменение способов совладания со стрессовыми условиями (индивидуальных копинг-стратегий) у испытателей: у 6 из них к концу иммерсии начали проявляться неэффективные копинг-стратегии, ориентированные на уход от решения проблем и социальную изоляцию, снизились способности к позитивной переоценке, проявлению эмоций, юмору и принятию стрессовой ситуации; повысились мысленный и поведенческий уход от решения проблем, отрицание. Двое испытателей, напротив, по завершении эксперимента отметили у себя повышение позитивной переоценки событий, использование юмора и социальной поддержки, принятия трудностей, что проходило на фоне снижения активного совладания с проблемами подавления эмоций и сдерживания импульсивных действий.

Обследуемые, проявившие неэффективные формы совладания со стрессом, демонстрировали сочетание типологических черт экстравертов и интуитов, определенных по методике Кейрси. Такие личности активно вовлечены в общение с людьми, но при этом при принятии решений опираются на собственную интуицию, вне зависимости от того, как поступают в подобных ситуациях окружающие. С другой стороны, обследуемые, сочетающие в себе черты экстравертов и сенсориков (для которых характерны прагматичность и здравомыслие, склонность полагаться на жизненный опыт), более эффективно справлялись со стрессовыми воздействиями, обусловленными нахождением в условиях «сухой» иммерсии. Речь данных обследуемых была более громкой (по уровню интенсивности), отмечались более высокая ЧОТ и большее количество биений тона речи.

Результаты анализа акустических характеристик речи. В целом у большинства испытателей, несмотря на выраженные индивидуальные особенности и влияние циркадианных ритмов, наблюдались некоторые общие закономерности изменения акустических характеристик речи в ходе иммерсионного воздействия. Интерес представляют следующие периоды: 1–5-е сутки (период адаптации к экспериментальным условиям), 8–10-е сутки, 14–16-е сутки и период окончания воздействия.

На 2-3-и сутки у обследуемых отмечалось пиковое по сравнению с 1-ми сутками повышение частоты основного тона речи, значительно возрастало количество биений (р < 0,05 на 3-и сутки) (одновременное звучание 2 тонов минимально различающейся частоты, возникающие при неполном смыкании голосовых связках, что обычно является проявлением усталости) и процента шиммера (p < 0.05на 3-и сутки) (нестабильности амплитуды последовательных голосовых импульсов) (рис. 1). В это же время обследуемые в самооценочной методике POMS сообщали о значительном нарастании подавленного настроения, усталости и тревожности, в то время как их дружелюбие и активность снижались. Можно предположить, что в указанный период времени обследуемые переживали повышенную психофизиологическую напряженность, связанную с адаптацией к воздействию, с проявлениями негативных, болезненных симптомов и физиологических реакций, нарастанием воспринимаемого дискомфорта.

После 3-4-х суток (в зависимости от индивидуальных особенностей испытателей), судя по снижению ЧОТ до нормальных значений, уменьшению шиммер-эффекта и количества биений, выравниванию громкости и уменьшению доли неозвученных речевых фрагментов (пауз в речи), обследуемые адаптировались к воздействию микрогравитации и гиподинамии (см. рис. 1 и 2). Далее, начиная с 5-х суток и на протяжении всего последующего эксперимента отмечалось периодическое возвращение повышенного количества биений и шиммер-эффекта (которые были заметны в 5, 9-10-е и 14-16-е сутки пребывания в условиях «сухой» иммерсии), что свидетельствует о психофизиологической напряженности в эти дни. Особенно следует отметить следующий период эксперимента – 14–16-е сутки, в которые помимо обозначенных акустических эффектов обнаруживались также скачки ЧОТ речи и увеличивалась доля неозвученных речевых фрагментов (см. рис. 1). В это же время испытатели сообщали о появлении головных болей, нарушении сна и ухудшении настроения.

На протяжении всего эксперимента отмечалась циркадианная вариативность ряда речевых характеристик, в частности, увеличение разницы между долей неозвученных фрагментов речи и

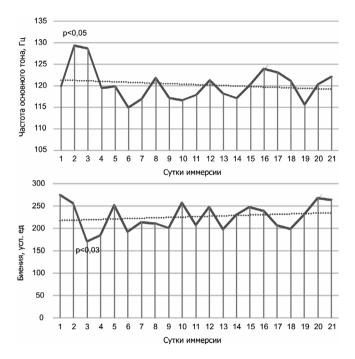


Рис. 1. Динамика частоты основного тона (ЧОТ) и количества биений частот речи обследуемых в среднем по группе в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии

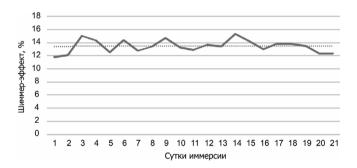


Рис. 2. Динамика выраженности шиммер-эффекта в среднем по группе в ходе эксперимента с «сухой» иммерсией

шиммер-эффектом во время утренних и вечерних записей (утром, как правило, количество пауз в речи было большим, а шиммер-эффект меньшим, вечером — наоборот). Однако, начиная с 14-х суток, имели место изменения в суточной периодичности изменения данных показателей, с возвращением к исходным значениям только к концу эксперимента (20-е сутки). В этот же период появлялся один из пиков тревожности по Спилбергеру и МЦВ.

В период окончания воздействия обследуемые в среднем демонстрировали наименьший уровень тревожности и фрустрации за все время эксперимента, по опроснику POMS установили возросшую активность, дружелюбие и некоторую растерянность. Возросшее количество биений и повышение ЧОТ могло свидетельствовать о фоновой усталости и напряженности. Можно предположить

проявления эффектов антиципации окончания достаточно сложного для участников эксперимента.

Результаты когнитивных тестов и тестов на сенсомоторную координацию. Когнитивные тесты, проводившиеся раз в 3 сут, показали изменчивость некоторых психических и сенсомоторных функций в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии, что, вероятно, было связано с изменениями функционального состояния обследуемых.

В 1-е сутки обследуемые демонстрировали повышенную лабильность в сенсомоторной координации, при этом количество точно выполненных заданий на координацию и экстраполяцию было высоким (рис. 3). Вместе с тем задания, требующие математического счета, вызывали у обследуемых больше затруднений (рис. 4). Это может свидетельствовать о возбужденном психофизиологическом состоянии испытателей в первые дни «сухой» иммерсии.

Начиная с 4—7-х суток показатели высших психических функций выходили на плато — отмечалось некоторое снижение лабильности и точности сенсомоторной координации, существенно снижалось количество ошибок при счете.

На 13–16-е сутки обследуемые показывали возрастание лабильности, при этом наблюдалось кратковременное резкое повышение точности (см. рис. 3). Неравномерные результаты точности при координации и экстраполяции показывают, что в этот период эксперимента происходило существенное улучшение координационного навыка, притом что лабильность мешала осуществлению деятельности, связанной с антиципацией — предугадыванию предмета или события, возникающему до акта их восприятия. Количество ошибок при счете в это время возрастает при утреннем выполнении тестов и значительно снижается при вечернем выполнении (см. рис. 4).

Результаты статистического анализа. Факторный анализ акустических показателей речи, результатов когнитивных тестов и теста STAI позволил выделить значимые для данного исследования компоненты. По результатам анализа были выбраны показатели, входящие в первую и вторую главные компоненты и имеющие наиболее высокую факторную нагрузку.

Первый компонент полученной матрицы показал обратную связь между точностью и лабильностью сенсомоторного теста «РДО Координация» и более высокой ЧОТ, громкостью и большим количеством биений. Второй компонент представлял обратную связь между временем выполнения простых математических операций и процентом пауз в речи, джиттер- и шиммер-эффектами.

Для выявления связей выбранных показателей внутри главных компонент был проведен корреляционный анализ (по Пирсону).

Результаты показали значимые корреляции (p < 0,01) между такими речевыми показателями,

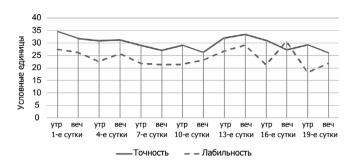


Рис. 3. Данные по тесту «РДО Координация»: точность выполнения и лабильность сенсомоторного ответа в среднем по группе обследуемых в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии

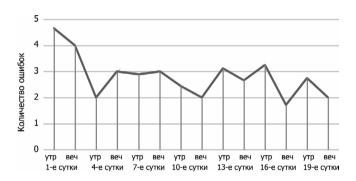


Рис. 4. Количество ошибок при выполнении простых математических операций в среднем по группе обследуемых в ходе 21-суточной «сухой» иммерсии

как ЧОТ и количество биений тона речи, и результатами методики «РДО Координация» — точностью и лабильностью (табл. 1). Данная связь является обратной: лучшее выполнение теста приходилось на сенсомоторную координацию при более низком тоне речи и меньшем количестве биений.

Установленную связь можно интерпретировать как отражение состояния оптимальной психофизиологической мобилизации – такого функционального состояния человека-оператора, при котором отсутствует, с одной стороны, высокая психофизиологическая напряженность (которой могут соответствовать повышение ЧОТ и громкости речи), а с другой – состояние утомления и астенизации (проявляющимися, по нашим наблюдениям, в увеличении количества биений тона речи). Данный оптимум описывается законом Иеркса – Додсона (и его модификациями), часто применяемым в спортивной психологии: для достижения максимального результата необходим оптимальный уровень психофизиологического возбуждения [14]. Помимо этого в рамках данного эксперимента была обнаружена значимая связь между ЧОТ, громкостью и количеством биений тона речи (см. табл. 1).

Таблица 1

Корреляционные связи некоторых речевых показателей (ЧОТ, интенсивности (громкости) и количества биений тона речи) с данными сенсомоторного теста «РДО Координация»

Исследуемые показатели	Коэффициенты корреляции	ЧОТ средняя	Интенсивность речи (громкость)	Количество биений тона	«РДО Координация». Точность	«РДО Координация». Лабильность
ЧОТ средняя	Корреляция Пирсона	1	0,214*	0,344*	-0,471*	-0,385*
	Знч. (2-сторон.)	-	0,000	0,000	0,000	0,000
	n	317	317	317	105	105
Интенсивность речи (громкость)	Корреляция Пирсона	0,214*	1	0,262*	-0,018	-0,026
	Знч. (2-сторон.)	0,000	-	0,000	0,856	0,795
	n	317	317	317	105	105
Количество биений тона	Корреляция Пирсона	0,344*	0,262*	1	-0,290*	-0,331*
	Знч. (2-сторон.)	0,000	0,000	-	0,003	0,001
	n	317	317	317	105	105
«РДО Координация». Точность	Корреляция Пирсона	-0,471*	-0,018	-0,290*	1	0,813*
	Знч. (2-сторон.)	0,000	0,856	0,003	-	0,000
	n	105	105	105	105	105
«РДО Координация». Лабильность	Корреляция Пирсона	-0,385*	-0,026	-0,331*	0,813*	1
	Знч. (2-сторон.)	0,000	0,795	0,001	0,000	-
	n	105	105	105	105	105

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – корреляция значима на уровне 0,01 (2-сторон.).

Таблица 2

Корреляционные связи между процентом пауз в речи и временем, затраченным на выполнение простых математических операций

Исследуемые показатели	Коэффициенты корреляции	Неозвученные речевые фрагменты (паузы)	Джиттер	Шиммер	Чет-Нечет. Время
	Корреляция Пирсона	1	0,451*	0,502*	-0,355*
Неозвученные речевые фрагменты (паузы)	Знч. (2-сторон.)	-	0,000	0,000	0,000
франтенты (паузы)	n	317	317	317	105
	Корреляция Пирсона	0,451*	1	0,570*	-0,178
Джиттер	Знч. (2-сторон.)	0,000	-	0,000	0,069
	n	317	317	317	105
	Корреляция Пирсона	0,502*	0,570*	1	-0,183
Шиммер	Знч. (2-сторон.)	0,000	0,000	-	0,062
	n	317	317	317	105
	Корреляция Пирсона	-0,355*	-0,178	-0,183	1
Чет-Нечет. Время	Знч. (2-сторон.)	0,000	0,069	0,062	-
	n	105	105	105	105

Корреляционный анализ показателей второго компонента выявил значимую отрицательную корреляцию (р < 0,01) между процентом пауз в речи (неозвученных речевых фрагментов) и временем, затраченным на выполнение простых математических операций (табл. 2). Характер этой связи может указывать на доминирование внутренних когнитивных процессов (в частности, внутреннего внимания) человека-оператора над внешними. При таком распределении внимания человек меньше взаимодействует с людьми или другими раздражителями внешнего мира, но при этом, как правило, быстрее решает абстрактные задачи, фокусируясь на факторах внутреннего поля [15].

В данном исследовании была установлена значимая корреляция между неозвученными речевыми фрагментами (паузами) и вариативностью частотных и амплитудных характеристик – джиттером и шиммером. Косвенно, на уровне тенденций, они также связаны со временем принятия решений (см. табл. 2).

Данные, полученные в ходе эксперимента с использованием 21-суточной «сухой» иммерсии, нуждаются в сравнении с аналогичными данными, полученными в экспериментах, отличающихся по длительности, характеру воздействия (либо с дополнительными воздействиями) и другим половозрастном составом испытателей, для выявления более общих закономерностей, а также классификации вариантов реагирования на воздействие в зависимости от типологических особенностей испытателей.

Выводы

- 1. Показано наличие значимых периодов адаптации к условиям 21-суточной «сухой» иммерсии. К ним относились: острый период адаптации (1–3-е сутки); период устойчивой адаптации («плато», начинающееся с 5–6-х суток); вторая волна адаптации (14–16-е сутки) и период завершения воздействия (19–21-е сутки). Помимо этих периодов на протяжении всего эксперимента отмечалась циркадианная вариативность ряда речевых характеристик, в частности, увеличение разницы в доле неозвученных фрагментов речи и шиммер-эффекта между утренними и вечерними записями.
- 2. Обнаружены значимые корреляционные связи между акустическими характеристиками речи и сенсомоторными и когнитивными показателями:
- установлена обратная связь между качеством выполнения теста на сенсомоторную координацию и значениями ЧОТ и количеством биений тона речи;
- меньший процент пауз в речи (неозвученных речевых фрагментов) связан с меньшим временем принятия решения при простых математических операциях.

- 3. У обследуемых наблюдалась динамика выбора способов совладания со стрессом (копинг-стратегий) под воздействием факторов 21-суточной «сухой» иммерсии: у 6 из них наблюдалось увеличение использования неэффективных способов совладания, у 2 увеличение использования эффективных копинг-стратегий, способствовавших лучшей адаптации к сложным условиям.
- 4. Установленные в настоящем исследовании связи между изученными показателями могут быть использованы для прогнозирования работоспособности операторов с помощью анализа акустических характеристик речи.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-75-10086.

Список литературы

1. *Картавенко М.В.* Об использовании акустических характеристик речи для диагностики психических состояний человека // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. No 5

Kartavenko M.V. About the use of acoustic characteristics of speech for the diagnosis of human mental states // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2005. № 5.

- 2. Gushin V.I., Yusupova A.K., Shved D.M. et al. The evolution of methodological approaches to the psychological analysis of the crew communications with Mission Control Center // REACH Reviews in Human Space Exploration. 2016. V. 1. P. 74–83.
- 3. Johannes B., Salnitski V., Soll H. et al. De-individualized psychophysiological strain assessment during a flight simulation test validation of a space methodology // Acta Astronaut. 2008. V. 63. P. 791–799.
- 4. Григорьев А.И., Егоров А.Д. Длительные космические полеты // Космическая биология и медицина. Совм. рос.-амер. изд.: В 5 т. Т. 3. Кн. 2. Человек в космическом полете / В.В. Антипов, А.И. Григорьев, К. Лич Хантун, ред. М., 1997. С. 368–447.

Grigoriev A.I., Egorov A.D. Long space flights // Space medicine and biology. Joint Rus.-Amer. Publ.: In 5 v. V. 3. Book 2. Man in spaceflight / V.V. Antipov, A.I. Grigoriev, K. Leach Khantun, eds. Moscow, 1997. P. 368–447.

- 5. Leach Huntoon C.S., Grigoriev A., Natochin Yu. Fluid and electrolyte regulation in spaceflight // An Amer. Astr. Society Publ., SAE Series. San Diego, 1998. V. 94.
- 6. *Козловская И.Б.* Фундаментальные и прикладные задачи иммерсионных исследований // Авиакосм. и экол. мед. 2008. Т. 42. № 5. С. 3-8.

Kozlovskaya I.B. Fundamental and applied problems of immersion research // Aviakosmicheskaya i ekologicheskiaya meditsina. 2008. V. 42. Nº 5. P. 3–8.

7. Романенко В.О. Эмоциональные характеристики речи и их связь с акустическими параметрами // Общество. Среда. Развитие 2011. Т. 3. \mathbb{N}° 20. С. 124—127.

Romanenko V.O. Emotional characteristics of speech and their relationship with acoustic parameters // Obshchestvo. Sreda, Razvitie, 2011, V. 3. № 20, P. 124–127.

- 8. *Mcnair D.M., Lorr M., Droppleman L.F.* Manual for the profile of mood states. San Diego, 1971.
- 9. *Собчик Л.Н.* МЦВ метод цветовых выборов. Модифицированный восьмицветовой тест Люшера: Практическое руководство. СПб., 2001.

Sobchik L.N. MHC is a color election method. Modified eight-color Luscher's test: A practical guide. St. Petersburg, 2001.

- 10. *Spielberger C.* Anxiety: Current trends in theory and research. N.Y., 1972. V. 1. P. 24–55.
- 11. Овчинников В.П., Павлов К.В., Владимирова И.М. Типы темперамента в практической психологии. СПб., 2003.

Ovchinnikov V.P., Pavlov K.V., Vladimirova I.M. Types of temperament in practical psychology. St.-Petersburg, 2003.

12. Рассказова Е.И., Гордеева Т.О., Осин Е.Н. Копингстратегии в структуре деятельности и саморегуляции: психометрические характеристики и возможности применения методики СОРЕ // Психология: Журнал Высшей школы экономики. 2013. Т. 10. № 1. С. 82—118.

Rasskazova E.I., Gordeeva T.O., Osin E.N. Coping strategies in the structure of activity and self-regulation: psychometric characteristics and possibilities of applying the COPE technique // Psikhologiya: Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki. 2013. V. 10. № 1. P. 82–118.

13. Лебедева С.А., Швед Д.М., Гущин В.И. Предварительные результаты изучения функционального состояния человека-оператора методом анализа акустических характеристик речи в условиях моделируемых факторов космического полета // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53. № 2. С. 50–56.

Lebedeva S.A., Shved D.M., Gushhin V.I. Preliminary results of studying the functional state of a human operator by analyzing the acoustic characteristics of speech under conditions of simulated space flight factors // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2019. V. 53. \mathbb{N}° 2. P. 50–56.

14. *Сопов В.Ф.* Теория и методика психологической подготовки в современном спорте: Метод. пос. М., 2010.

Sopov V.F. Theory and methodology of psychological preparation in modern sport: Handbook. Moscow, 2010.

15. *Лурия А.Р.* Лекции по общей психологии. СПб., 2006.

Luriya A.R. Lectures in general psychology. St.-Petersburg, 2006.

Поступила 13.02.2020

INVESTIGATION OF HUMAN PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE IN THE CONDITIONS SIMULATING THE MICROGRAVITY EFFECTS USING THE ACOUSTIC METHOD OF SPEECH ANALYSIS

Lebedeva S.A., Shved D.M., Fedyai S.O.

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

The work was devoted to the investigation of psychophysiological response of human operators exposed to simulated spaceflight factors. This was a pioneering comprehensive functional evaluation of human subjects during 21-d dry immersion (DI) using voice acoustic analysis together with the psychological and psychophysiological methods, cognitive and sensorimotor testing. Comparison of speech and cognitive data dynamics in DI revealed the existence of adaptation periods and established significant correlations between some voice parameters and results of cognitive and sensorimotor tasks implementation.

Key words: speech analysis, sensorimotor coordination, cognitive tests, functional state, simulation study, microgravity, dry immersion.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 45–51.

УДК 629.788:007.51; 164.053; 004.946

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧЕЛОВЕКА С ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛЬЮ ЛУННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Бубеев Ю.А.¹, Усов В.М.^{1, 4}, Сергеев С.Ф.^{2, 3}, Крючков Б.И.⁴, Михайлюк М.В.⁵

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва ²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: bubeev@imbp.ru

В статье рассмотрен примененный в изоляционных экспериментах исследовательский инструментарий для изучения особенностей взаимодействия «человек — мобильные роботы» на поверхности Луны. Предложен многосредовый подход, направленный на выяснение роли человеческого фактора в перспективных проектах пилотируемый космонавтики, дополняющий традиционные методы экспериментальной психологии и психофизиологии труда.

Ключевые слова: космическая психофизиология, человек-оператор, взаимодействие «человек – робот», изоляционные эксперименты, мультисредовый подход к моделированию деятельности космонавта, виртуальная среда моделирования (виртуальные полигоны).

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. T. 54. № 2. C. 52–59.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-52-59

Космическая медицина и психофизиология труда обладают уникальными технологиями проведения многосуточных изоляционных экспериментов, позволяющих реализовать наземное моделирование длительных экспедиций и условия жизнедеятельности космического экипажа при освоении Луны [1–3].

В сериях изоляционных экспериментов, выполненных в разные годы, последовательно расширен арсенал инструментальных средств моделирования сложных видов операторской деятельности. Начало положило создание комплекса-тренажера для космического эксперимента (КЭ) «Пилот-Т» [4, 5]. Этот пример успешного воспроизведения целостного фрагмента операторской деятельности при решении экипажем задач сближения и стыковки пилотируемых космических аппаратов (ПКА) показывает рациональный путь решения в эксперименте вопросов распределения функций между человеком и техникой в русле традиций отечественной авиационной медицины и инженерной психологии [6, 7].

По мере развития средств деятельности космонавтов применительно к выполнению задач внекорабельной деятельности (ВКД), а в перспективе – и напланетной ВКД стала очевидной необходимость применения многосредового подхода к изучению и описанию условий работы лиц опасных профессий, в которых критически важные элементы деятельности требуют компьютерного моделирования (путем создания виртуальных иммерсивных сред) ввиду высоких рисков для жизни и здоровья космонавтов при проведении испытаний в реальных условиях. Ранее применительно к управлению лунным ровером в рамках проекта «Марс-500» были реализованы модели операторской деятельности, основанные на технологиях виртуальной реальности (ВР) [3].

Применение многосредового подхода создает условия «погружения» в интерактивную среду [7—11]. При этом с точки зрения космической физиологии важен контроль условий возникновения иллюзорного восприятия движения (из-за возможного сенсорного конфликта), а с точки зрения экспериментальной психологии необходимо «включение» человека-оператора (ЧО) в непрерывный контроль ситуации, обеспечивающий своевременное реагирование [7]. Риск возникновения подобных нештатных ситуаций на поверхности Луны возможен при коллизиях автономных мобильных роботов (АМР) [11].

Виртуальные полигоны как средство моделирования условий взаимодействия космонавта с мобильным роботом на поверхности Луны

К настоящему времени инженерная психология внесла серьезные уточнения и коррективы в содержание и понимание «виртуального» при разработке теории и методологии исследования систем «человек – техника», в частности, при описании феноменов «погружения» человека в виртуальные искусственные среды [8, 9].

³Санкт-Петербургский государственный университет

⁴Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская область

⁵Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований РАН», Москва

Исходя из классификации ВР, предложенной в работах [12, 13], наибольший интерес представляют технологии, обеспечивающие компьютерное моделирование реального мира и интерактивное взаимодействие с ним. В этом контексте, следуя работе [14], можно ввести термин «виртуальное окружение», под которым понимается вид человеко-машинного взаимодействия, обеспечивающий «погружение» оператора в 3D-интерактивную визуальную среду моделируемого явления, процесса или ситуации и опирающийся на «естественный» интерфейс для взаимодействия с представленными в ней объектами.

Специфическим отличительным признаком использования инструментов ВР в моделях дистанционного управления космическими роботами является перманентный синтез полученной из разных источников информации о физическом мире, в которую входит:

- ранее собранная информация от роботов-разведчиков о рельефе местности и естественных образованиях на лунной поверхности;
 - фотоснимки поверхности Луны со спутников;
- внесенные при формировании плана работ с применением робототехнических систем (РТС) сведения навигационного характера об искусственных объектах на поверхности Луны;
- массив оперативно собираемой с помощью бортовых сенсоров и датчиков РТС текущей информации об обстановке с привязкой к навигационным ориентирам в локальной системе координат и др.

Такое понимание ВР является аргументом в пользу необходимости специальной организации отображения данных для ЧО и предоставления ему некоторого набора инструментов, облегчающих доступ к информации и манипулированию данными, в том числе за счет модификации виртуальной среды в интересах решения текущих оперативных задач. Особенности решения данного круга вопросов обсуждаются в ряде статей [10, 17–19].

В качестве перспективного способа преодоления ограничений, связанных с человеческим фактором, предлагается более широкое использование индуцированных виртуальных сред, расширяющих возможности представления и использования информации путем конструирования требуемой ситуацией формы визуальной среды для ведения пространственной ориентировки, образного восприятия обстановки, избирательного внимания к источникам конфликтов интересов активных агентов и др. [8, 9].

В целом предлагаемый подход, позволяющий спроектировать виртуальное окружение для комплексных изоляционных экспериментов, можно назвать «многосредовым», поскольку в фокусе внимания применительно к проектам пилотируемых полетов находятся условия реальной физической среды, задающие параметры обитаемости гермообъекта,

что позволяет оценить динамику функционального состояния ЧО, и одновременно вопросы психической регуляции поведения и деятельности ЧО в виртуальном окружении.

Регуляторной основой деятельности становится психический образ, связанный с синтезированной визуальной обстановкой, трактуемой в терминах построения зрительной обратной связи. Дополнительное условие в традициях авиационной психофизиологии состоит в требовании сохранить для ЧО постоянный доступ к инструментальным измерениям полетных данных, на базе которых у ЧО формируется «информационный образ» (как инструментальная основа формирования регуляторного психического образа), что соответствует концепции «образа полета» [15, 16, 20, 21].

К динамично развивающимся областям инженерной психологии и информатики входит исследование вопросов синтетического построения визуальной среды, оценки ее влияния на надежность человеческого звена, на психические процессы, связанные с восприятием пространства, перемещением мобильных объектов, выявлением и распознаванием естественных и искусственных объектов и др. Особенно это важно, когда речь идет о такой малоизученной среде, как поверхность Луны. Объектом инженерно-психологического проектирования взаимодействия ЧО с АМР могут стать технологии дополненной виртуальной реальности (ДВР) и дополненной виртуальности (ДВ) как вариантов построения 3D-виртуальной среды (англ.: virtual 3D-environment).

Системы на базе ДВР и ДВ имеют следующие отличительные характеристики [22, 23, 33]:

- объединение в восприятии человека реального и виртуального пространства с включенными в него объектами физической и виртуальной природы;
- интерактивность при взаимодействии со средой и ее объектами в реальном времени, т.е. доступность объектов для воздействия в соответствии с принятыми соглашениями о предоставленных полномочиях и инструментах пользователя;
- пространственное отображение визуальных сцен в формате 3D.

Когда речь идет о приложениях робототехники в области взаимодействия человека с активными агентами в искусственной среде, эти позиции уточнены применительно к «виртуальным двойникам» реальных космических РТС [24–26].

В общем случае можно утверждать, что ДВР – это область информационных технологий, связанная с построением иммерсивных интерфейсов, предназначенная для «активного» управления объектами виртуальной среды, подчиняющихся как действию физических законов, так и управляющим воздействиям от задающих органов управления ЧО.

Особенности информационного обеспечения ЧО при дистанционном управлении АМР в недетерминированной среде

При дистанционном управлении сложными автоматизированными системами применительно к АМР необходимо отметить потребность ЧО в дополнительной информационной поддержке, имеющей ряд специфических особенностей, связанных с оперативным контролем активности агентов недетерминированной рабочей среды. Речь идет о предоставлении недостающих, достоверных и доступных для оперативного восприятия визуальных данных о состоянии окружающей среды, статических и динамических объектах, реакциях управляемого объекта на соответствующие команды оператора и пр.

Отметим, что дистанционный мониторинг с использованием различных оптико-электронных устройств может приводить к ошибкам зрительного контроля глубины сцены, взаимного расположения объектов, зрительной оценки движения объектов и др., что неизбежно сказывается на надежности и точности ведения космонавтом мониторинга АМР.

Дополнительные сложности возникают из-за воздействия неблагоприятных факторов космического полета на анализаторы человека. В частности, в невесомости может возникнуть ряд новых рисков ошибок управления космическим роботом в дистанционном режиме из-за нарушений в работе сенсорных систем (зрительного, вестибулярного и проприоцептивного анализаторов человека) [27, 28].

Основная проблема инженерно-психологического проектирования деятельности ЧО при дистанционном управлении РТС состоит в обеспечении двигательного акта «здесь и сейчас», «точно по месту» расположения объекта труда в рабочей зоне, исходя из сформулированных ЧО задач, в точном соответствии с требованиями текущей ситуации. Сама ситуация при этом может достаточно динамично изменяться. Принципиально важным, по нашему мнению, является положение о том, что для зрительного обеспечения контроля двигательной активности робота необходимо, чтобы зрительный канал поступления информации обеспечивал условия обеспечения «объектности» и константности восприятия. Если за период прохождения сигналов прямой и обратной связи зрительная сцена претерпевает значимые изменения, то нет гарантии адекватного восприятия текущей ситуации, что может привести к запаздыванию управляющих решений. В такой ситуации ограниченность каналов (обратной связи) для контроля актуальных событий и (текущей) ситуации необходимо компенсировать искусственными приемами (например, созданием индуцированных сред путем введения в наблюдаемую сцену виртуальных объектов, «разметкой зрительной сцены», «изменения масштаба течения времени» и т.д.), которые ориентированы на визуальное обеспечение решения операторской задачи. Информационная поддержка служит для обеспечения уверенности в том, что заранее сформированная схема управления роботом пригодна к исполнению в конкретной текущей ситуации. Для системы «космонавт – РТС» можно рассмотреть ситуацию, когда космонавт заранее сформировал (например, методом показа движения) рациональные способы управления манипулятором — наведение исполнительных органов робота на объект воздействия [29].

Проблемы дистанционного управления космическими роботами

При переходе к дистанционному управлению на значительных удалениях 40 от управляемого объекта и от рабочей зоны, в которой необходимо решать производственные задачи, значимо возрастают требования к каналам связи между ЧО и РТС (по быстродействию, пропускной способности, защищенности от помех и другим характеристикам), что далеко не всегда можно обеспечить на текущем уровне развития технических средств связи. Эта задача, в частности, исследовалась в КЭ «Контур-2» [30, 31]. Показано, что задержки в поступлении сигналов при организации прямой и обратной связи приводят к снижению качества деятельности ЧО. Снижается точность восприятия человеком истинного положения робота относительно других объектов, возникают трудности правильной оценки скорости движения, локализации объектов в рабочей среде и др.

В широком плане инженерно-психологическое проектирование системы «ЧО - AMP - объект воздействия - окружающая среда» должно раскрыть роль и механизмы реализации прямых и обратных связей в деятельности ЧО при взаимодействии с РТС для решения задачи телеуправления. Психологическое содержание проблемы определяется тем, что, в отличие от прямого наблюдаемого поведения РТС, в случае удаленного контроля человек вынужден довольствоваться ограниченным набором косвенных данных, которые в своей совокупности не всегда могут гарантировать точное соответствие реальному состоянию объектов в рабочем пространстве из-за запаздывания поступления информации, ее искажения вследствие ошибок при «наложении» зрительных сцен и технического смешения сигналов, полученных из разных источников визуального контроля обстановки. По этой причине при телеуправлении космической РТС без виртуальной реконструкции рабочего пространства и визуализации всех его стационарных и динамических объектов в виде 3D-моделей у 4O снижается способность вести пространственную ориентировку, навигацию и позиционирование робота в рабочей

зоне, что снижает безопасность взаимодействия исполнительных органов робота с объектом воздействия в рабочей среде [22, 23].

В большинстве случаев, когда человек не может физически присутствовать (или длительно пребывать) в той же физической среде, что и робот, из-за рисков для здоровья, решение задачи дистанционного управления состоит в пространственном «разнесении» рабочего окружения для синхронно взаимодействующих в едином масштабе времени активных агентов: человек работает на определенном удалении от робота в безопасной (защищенной) рабочей среде, а робот функционирует под контролем человека во внешней сре-

де, в том числе в экстремальной обстановке, а взаимодействие осуществляется через интерактивную визуальную среду (рис. 1).

Если эти две части контура управления разнесены в пространстве на небольшое расстояние, например разные отсеки одной и той же орбитальной станции, то скорость обмена данными не является лимитирующим условием взаимодействия «человек – робот» при ведении коммуникации и интерактивном обмене данными по каналам связи, что позволяет поддерживать режим реального времени управления роботом (т.е. значимые «события» в этих рабочих средах полностью синхронизированы с точки зрения ЧО).

В этом случае пространственный фактор не затрудняет взаимодействие коммуникантов в распределенной рабочей среде. Но на значительном удалении, например, при управлении с Земли роботом, находящимся на окололунной станции или на лунной поверхности, фактор удаленности (на «космические расстояния») может стать критическим с точки зрения надежности операторской деятельности из-за задержек прохождения сигналов по линиям связи и дополнительных трудностей реализации обратной связи в контуре управления [26].

Для ориентировки в удаленной среде ЧО сегодня может более полно использовать бортовое оборудование робота: при необходимости задействовать функции восприятия визуальной картины (через систему технического зрения), идентификации движущихся объектов и расстояний до них (инструменты дальнометрии), получения информации о параметрах местоположения, что способствует повышению безопасности. Оптоэлектронные приборы и телевизионная техника позволяют расширить возможности ЧО по визуальному контролю окружения робота. Создаются условия для контроля результативности действий робота по данным с видеокамер.



Рис. 1. Отношения «человек – робот – рабочая среда – объект воздействия» при визуализации виртуальной среды

На схеме (рис. 2) показаны отношения между физически существующими и синтезированными в цифровой форме объектами, размещаемыми в виртуальном окружении.

При невозможности получать информацию непосредственно из удаленной среды с помощью органов чувств ЧО должен быть обеспечен информацией из искусственной среды. При этом переходе изменяются отношения «человек - робот - объект воздействия», так как желаемый эффект управления роботом достигается интерактивным взаимодействием с его виртуальной моделью. Синхронизация рабочих сред обеспечивается специальными программно-информационными средствами, которые не только позволяют создавать 3D-образ объекта, но и наделять его свойствами интерактивности, а также использовать в качестве элементов пользовательского интерфейса. В этом, собственно, и заключен позитивный эффект применения индуцированной ВР (ИВР) для дистанционного управления РТС. Рассмотрим вариант построения ВР в интересах поддержки управления роботом при ВнеКД космического экипажа с применением иммерсивного интерфейса [33].

Сделан акцент на семантически значимых конструкциях, дающих возможность в режиме супервизорного управления с высокой надежностью задавать команды-предписания роботу, контролировать их исполнение и при необходимости оперативно корректировать задание, используя «естественный» вид интерфейса «со стороны внешнего наблюдателя». Это позволяет использовать систему координат, связанную с координатами свободно перемещающейся в пространстве «летающей виртуальной видеокамеры».

Оригинальное решение построения интерфейса с ИВР в системе «человек – РТС» в цитируемой публикации состоит в том, что в виртуальной среде

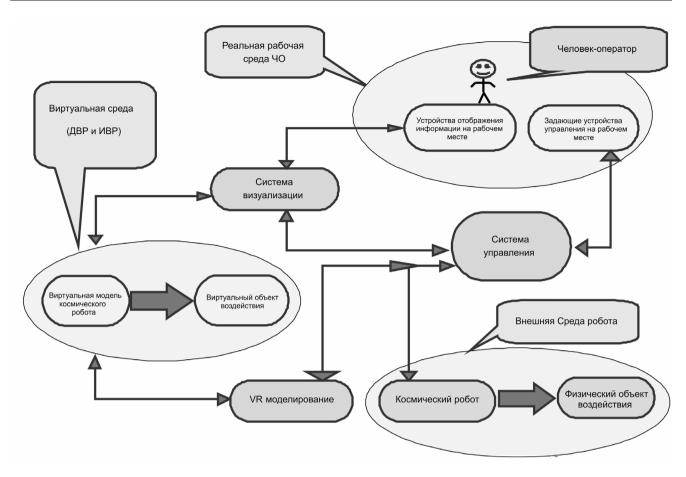


Рис. 2. Схема применения ВР при дистанционном управлении космическим роботом

выделены 3 функционально различающихся слоя взаимодействия с ней, которые были условно названы: «физический слой», «слой оператора» и «целевой слой» визуального представления. Краткое изложение этого подхода приведено в работе [33].

В целом представленные перспективные виды иммерсивного интерфейса «человек – робот», включающие индуцированные и физические взаимодействующие контуры управления, уже сегодня дают возможность реализовать достаточно сложные виды операторской деятельности космонавтов, в которых РТС оказывают поддержку экипажу в интерактивном режиме. Тем не менее, по нашему мнению, требуется продолжение исследовательских работ на основе многосредового подхода, так как многие проблемы, связанные с ним, не имеют в настоящее время достаточного эмпирического обоснования.

Выводы

1. Надежное функционирование РТС на поверхности Луны требует проектирования человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего управление в условиях измененной (по сравнению с земными условиями) гравитации и связанных с

ними расстройствах механизмов восприятия, возникающих у космонавтов.

- 2. Особую важность для операторских профессий представляют вопросы построения индуцированных виртуальных сред, предназначение которых улучшить передачу данных о физической (удаленной) среде, усилить отличительные признаки конкретных объектов, представить дополнительные данные о реально происходящих событиях в физическом окружении и, главное, обеспечить в режиме реального времени синхронизацию событий, происходящих в реальном физическом мире и в моделируемом виртуальном окружении.
- 3. Созданы научно-технологические предпосылки к расширению методических и инструментальных возможностей проведения комплексных изоляционных экспериментов посредством создания моделей виртуального окружения (виртуальных полигонов) с целью учета человеческого фактора при освоении Луны с применением мобильных роботов.

Работа поддержана темой РАН № 63.2 «Исследование интегративных процессов в центральной нервной системе, закономерностей поведения и деятельности человека в условиях

автономности и под влиянием других экстремальных факторов среды».

Список литературы

1. Швед Д.М., Гущин В.И., Бубеев Ю.А. и др. Основные результаты психофизиологических исследований в эксперименте «Марс-500» // Вестник РАН. Т. 84. № 3. 2014. С. 212–221.

Shved D.M., Gushchin V.I., Bubeev Yu.A. et al. The main results of psychophysiological studies in the «Mars-500» experiment // Vestnik RAN. V. 84. Nº 3. 2014. P. 212–221.

2. Боритко Я.С., Гущин В.И., Бубеев Ю.А. Операционные подходы к наземному моделированию длительной экспедиции для изучения индивидуального стиля операторской деятельности в интересах отбора космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. 2018. № 1 (26). С. 56–70.

Boritko Ya.S., Gushchin V.I., Bubeev Yu.A. Operational approaches to ground modeling of a long expedition for studying the individual style of operator activity in the interests of selection of cosmonauts // Pilotiruemye polety v kosmos. 2018. \mathbb{N}^{0} 1 (26). P. 56–70.

3. Ушаков И.Б., Бубеев Ю.А., Гущин В.И., Боритко Я.С. К проекту освоения Луны: некоторые инженерно-психологические и медицинские проблемы // Космическая техника и технологии. 2015. № 3 (10). С. 68–80.

Ushakov I.B., Bubeev Yu.A., Gushchin V.I., Boritko Ya.S. To the project of development of the Moon: some engineering-psychological and medical problems // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2015. Nº 3 (10). P. 68–80.

4. Сальницкий В.П., Мясников В.И., Бобров А.Ф. и др. Исследование надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») // Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина. Т. 2. Медикобиологические эксперименты. 2002. М., С. 285–300.

Salnitsky V.P., Myasnikov V.I., Bobrov A.F. et al. The Research of reliability of the activity of cosmonauts at various stages of a long space flight (experiment «Pilot») // Orbital station «Mir». Space biology and medicine. V. 2. Medical and biological experiments. 2002. Moscow, P. 285–300.

5. *Сальницкий В.П., Бронников С.В., Городецкий И.Г.* Психодиагностический комплекс-тренажер для оценки и прогнозирования надежности профессиональной деятельности космонавта // Приборы. 2008. № 4. С. 23–28.

Salnitsky V.P., Bronnikov S.V., Gorodetsky I.G. The Psychodiagnostic complex-simulator for evaluation and prediction of reliability of the professional activity of a cosmonaut // Pribory. 2008. Nº 4. P. 23–28.

6. Доброленский Ю.П., Пономаренко В.А. Образ полета // Авиация и космонавтика. № 4. 1976. С. 18–19.

Dobrolyenskiy Yu.P., Ponomarenko V.A. The Image of flight // Aviatsiya i kosmonavtika. № 4. 1976. P. 18–19.

7. Завалова Н.Д., Лапа В.В., Пономаренко В.А. Методологические вопросы анализа познавательных процессов оператора в критических ситуациях // Вопросы кибернетики. Проблемы измерения психических

характеристик человека в познавательных процессах. 1980. М., С. 132–148.

Zavalova N.D., Lapa V.V., Ponomarenko V.A. Methodological issues of the analysis of cognitive processes of the operator in critical situations // Questions of Cybernetics. Problems of measurement of human mental characteristics in cognitive processes. Moscow, 1980. P. 132–148.

8. *Сергеев С.Ф*. Эргономические проблемы проектирования интерфейса на базе индуцированных виртуальных сред // Мир Авионики. 2006. № 3. С. 62–67.

Sergeev S.F. Ergonomic problems of interface design based on induced virtual environments // Mir Avioniki. N^{o} 3. 2006. P. 62–67.

9. *Сергеев С.Ф.* Введение в инженерную психологию и эргономику иммерсивных сред: Учеб. пос. СПб., 2011.

Sergeev S.F. Introduction to engineering psychology and ergonomics of immersive environments: Textbook. St.-Petersburg, 2011.

10. Михайлюк М.В., Брагин В.И. Технологии виртуальной реальности в имитационно-тренажерных комплексах подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. № 2 (7). 2013. С. 82–93.

Mikhailyuk M.V., Bragin V.I. Virtual reality Technologies in simulation and training complexes for cosmonauts // Pilotiruemye polety v kosmos. № 2 (7). 2013. P. 82–93.

11. Крючков Б.И., Усов В.М., Иванько Д.В. Перспективы использования интеллектуальных пространств для информационной поддержки оператора при дистанционном мониторинге группы мобильных роботов на лунной поверхности // Матер. конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2018). СПб., 2018. С. 678–687.

Kryuchkov B.I., Usov V.M., Ivanko D.V. Prospects of using intelligent spaces for operator information support in remote monitoring of a group of mobile robots on the lunar surface // Proc. of the conference «Information technologies in management» (ITU-2018). St.-Petersburg, 2018. P. 678–687.

12. Самухин А.Х. Три подхода к трактовке виртуальности // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. № 31 (41). 2014. С. 140–145.

Samukhin A.Kh. Three approaches to the interpretation of virtuality // Istoricheskie, filosofskie, politicheskie i yuridicheskie nauki, kulturologiya i iskusstvovedenie. Voprosy teorii i praktiki. 2014. № 31 (41). P. 140–145.

13. Севальников А.Ю. Онтологические аспекты виртуальной реальности // Виртуалистика: экзистенциальные и эпистемологические аспекты. М., 2004. С. 208–242.

Sevalianikov A.Yu. Ontological aspects of virtual reality // Virtualistics: existential and epistemological aspects. Moscow, 2004. P. 208–242.

14. *Клименко С.В., Брагута М.В.* Использование систем виртуального окружения для визуализации информации в сфере управления электроэнергетическими системами // Вестник ИГЭУ. Вып. 4. 2008. С. 1–7.

Klimenko S.V., Braguta M.V. The use of virtual environment systems for visualization of information in the field of electric power systems management // Vestnik IGEU. V. 4. 2008. P. 1–7.

15. *Сергеев С.Ф., Падерно П.И., Назаренко Н.А.* Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов: Учеб. пос. СПб., 2011.

Sergeev S.F., Paderno P.I., Nazarenko N.A. Introduction to the design of intelligent interfaces: A textbook. St.-Petersburg, 2011.

16. Усов В.М., Крючков Б.И., Кулаков Ф.М. и др. Инженерно-психологический анализ технологий дополненной реальности для визуальной поддержки дистанционного управления роботом-манипулятором // Информация и космос. 2015. № 4. С. 58–67.

Usov V.M., Kryuchkov B.I., Kulakov F.M. et al. Engineering and psychological analysis of augmented reality technologies for visual support of remote control of robot manipulator // Informatsiya i kosmos. 2015. № 4. P. 58–67.

17. 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. Nº 2. P. 20–28.

18. Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. Технологии моделирования для эргономического проектирования системы «космонавт — манипуляционный робот — рабочая среда» // Матер. конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб., 2014. С. 367–377.

Kryuchkov B.I., Mikhaylyuk M.V., Usov V.M. Modeling technologies for ergonomic design of the system «cosmonaut - manipulation robot - working environment» // Proc. of the conference «Management in the marine and aerospace systems» (UMAS-2014). St.-Petersburg, 2014. P. 367–377.

19. *Сергеев С.Ф.* Человеческий фактор в самолетах 6-го поколения: проблемы техносимбиоза // Механика, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 12. С. 806—811. DOI: 10.17587/mau.19.806-811.

Sergeev S.F. Human factor in the aircraft of the 6th generation: problems of technosymbiosis // Mekhanika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2018. V. 19. № 12. P. 806–811. DOI: 10.17587/mau.19.806-811.

20. Пономаренко В.А., Ворона А.А., Алешин С.В. Развитие теоретических концепций пространственной ориентировки человека в особых условиях жизнеобеспечения // Психол. журнал. 1985. Т. 6. № 5. С. 41–51.

Ponomarenko V.A., Vorona A.A., Aleshin S.V. Development of theoretical concepts of spatial orientation of the person in special conditions of life support // Psikhologicheskiy zhurnal. 1985. V. 6. \mathbb{N}° 5. P. 41–51.

21. Якимович Н.В., Коваленко П.А. О целесообразности формирования двух типов «образа полета» у пилотов гражданской авиации // Нац. психол. журнал. 2012. № 2. С. 106—109.

Yakimovich N.V., Kovalenko P.A. On the feasibility of forming two types of «flight image» in civil aviation pilots // Natsional'ny psikhologicheskiy zhurnal. 2012. N°_{2} 2. P. 106–109.

- 22. *Azuma R.T.* A survey of augmented reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1997. V. 6. № 4. P. 355–385.
- 23. *Иванова А.В.* Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3 (106). С. 88–107.

Ivanova A.V. Technologies of virtual and augmented reality: opportunities and obstacles of application // Strategicheskie resheniya i risk-manadzhement. 2018. № 3 (106). P. 88–107.

- 24. *Milgram P.* Applications of augmented reality for human-robot communication // Proc. International Conference on Intelligent Robotics and Systems IROS'93. Yokohama, 1993. P. 1467–1472.
- 25. Coovert M.D., Lee T., Shindev I., Yongqiang Sun Spatial augmented reality as a method for a mobile robot to communicate intended movement // Computers in Human Behavior. 2014. No 34. P. 241–248.
- 26. *Kot T., Novák P., Babjak J.* Application of augmented reality in mobile robot teleoperation // Modelling and Simulation for Autonomous Systems MESAS 2017: Lecture notes in computer science. V. 10756. Cham: Springer, 2018. P. 223–236. DOI: 10.1007/978-3-319-76072-8_16.
- 27. Корнилова Л.Н. Результаты исследования вестибулярного аппарата и функции восприятия пространства у космонавтов // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1982. Т. 16. \mathbb{N}^{9} 1. С. 20–25.

Kornilova L.N. Results of the study of the vestibular apparatus and the function of space perception in cosmonauts // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1982. V. 16. No 1. P. 20–25.

28. *Корнилова Л.Н., Глухих Д.О., Хабарова Е.В. и др.* Зрительно-мануальное слежение после длительных космических полетов // Физиология человека. 2016. № 3. С. 82–93.

Kornilova L.N., Gluhikh D.O., Khabarova E.V. et al. Visual-manual tracking after long space flights // Fiziologiya cheloveka. 2016. № 3. P. 82–93.

29. Алферов Г.В., Кулаков Ф.М., Нечаев А.И., Чернакова С.Г. Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике: Учеб. пос. СПб., 2009.

Alferov G.V., Kulakov F.M., Nechaev A.I., Chernakova S.G. Information systems of virtual reality in mechatronics and robotics: Textbook. St.-Petersburg, 2009.

31. Заборовский В.С., Гук М.Ю., Мулюха В.А. Применение киберфизического подхода в задачах сетецентрического управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2 (3). С. 12–18.

Zaborovsky V.S., Guk M.Yu., Mulyukha V.A. Application of cyberphysical approach in the problems of network-centric control of robots // Robotekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2014. Nº 2 (3). P. 12–18.

32. Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Мулюха В.А. и др. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 6 (162). 2012. С. 23–32.

Zaborovsky V.S., Kondrat'ev A.S., Mulyukha V.A. et al. Remote control of robotic objects in space experiments of a series of «Kontur» // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatics. Telecommunications. Management. 2012. № 6 (162). P. 23–32.

33. Сергеев С.Ф., Сергеев А.В. Индуцированная среда иммерсивного интерфейса мобильного космического робота с силомоментным очувствлением // «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (ЭРГО-2018). Труды Третьей междунар. науч.-практ. конф. / А.Н. Анохин, А.А. Обознов, П.И. Падерно, С.Ф. Сергеев, ред. 2018. Тверь, С. 211–217.

Sergeev S.F., Sergeev A.V. Induced environment of the immersive interface of a mobile space robot with forcemoment sensing // «Human factor in complex technical systems and environments» (ERGO-2018). Proc. of the Third international scientific and practical conference / A.N. Anokhin, A.A. Oboznov, P.I. Paderno, S.F. Sergeev, eds. 2018. Tver, P. 211–217.

Поступила 27.11.2019

HUMAN INTERACTION WITH VIRTUAL MODEL OF A LUNAR MOBILE ROBOT IN ISOLATION EXPERIMENTS

Bubeev Yu.A.¹, Usov V.M.^{1, 4}, Sergeev S.F.^{2, 3}, Kryuchkov B.I.⁴, Mikhailyuk M.V.⁵

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

²Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University ³St.-Petersburg State University

⁴Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center, Star city, Moscow region

⁵Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper discusses the research instruments used in studying the human – mobile robot interactions on the lunar surface. The proposed multi-environmental approach is aimed at evaluation of the role of human factor in future piloted space programs in addition to the conventional methods of experimental psychology and labor psychophysiology.

Key words: space psychophysiology, human operator, human-robot interaction, isolation studies, multi-environmental approach to modeling cosmonaut's activity, virtual environment (virtual platforms).

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 52–59.

УДК 612.769+612.766

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ВЫВЕШИВАНИЕ КАК ЭЛЕМЕНТ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛОКОМОЦИЙ ЧЕЛОВЕКА

Артамонов А.А.¹, Орлов Д.О.¹, Пучкова А.А.¹, Шпаков А.В.¹, Воронов А.В.²

¹Научно-исследовательский институт космической медицины Федерального научно-клинического центра специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр физической культуры и спорта», Москва

E-mail: avshpakov@gmail.com

С целью верификации метода вертикального вывешивания человека как элемента виртуальной реальности при выполнении локомоций (ходьбы) в условиях различной гравитационной разгрузки опорно-двигательного аппарата проведены экспериментальные расчеты угловых скоростей в суставах нижней конечности, полученные методом видеоанализа движений. Соотношения угловых скоростей в суставах вычислены экспериментально в условиях гравитационной разгрузки и сопоставлены с соотношениями ускорений свободного падения в различных гравитационных условиях (Земля, Марс, Луна). Дополнительно проанализированы погрешности выполнения локомоций в различных гравитационных условиях по данным амплитуды угловых перемещений в суставах нижней конечности. Выявлена незначительная разница в расчетных и теоретических показателях соотношения угловых скоростей в суставах. Вариативность биомеханических параметров ходьбы изменяется в зависимости от величины гравитационной разгрузки опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: виртуальная реальность, вертикальное вывешивание, локомоции, гравитационная разгрузка, угловые скорости в суставах.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 60–64.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-60-64

Согласно определению термина, виртуальная реальность (virtual reality) — совокупность технологий, с помощью которых можно создать искусственный мир (или его элементы), физически не существующий, но ощущаемый органами чувств человека в реальном времени в соответствии с законами физики. Виртуальные объекты и субъекты, созданные техническими средствами, влияют на человека через его ощущения: обоняние, чувство равновесия и положения в пространстве, осязание, зрение, слух [1, 2].

Метод вертикального вывешивания (body weight support) в исследованиях локомоций не является

новым и используется специалистами в различных областях. Ряд исследователей и клинических специалистов использовали частичное снижение веса тела во время тренировок на беговой дорожке пациентов с болезнью Паркинсона [3]; лиц, перенесших инсульт и выполняющих реабилитационные мероприятия [4]. Значительная часть исследований выполнена специалистами по физической культуре и спорту [5, 6], а также специалистами в области космической медицины [7, 8]. Во всех вышеперечисленных областях применения вертикального вывешивания исследователи использовали какую-либо величину снижения веса тела пациента, рассчитанную в процентном соотношении от веса тела. При этом анализировались только физиологические или кинематические характеристики локомоций. В данной работе проведены математические расчеты кинематических характеристик локомоций и других физических величин для определения актуальности использования вертикального вывешивания человека с целью моделирования локомоций в различных условиях гравитационной разгрузки.

Для моделирования различных уровней гравитационной разгрузки опорно-двигательного аппарата, соответствующих гравитационным условиям на Земле (1 g), Марсе (0,38 g) и Луне (0,17 g), использовали модель вертикального вывешивания человека. Чтобы подтвердить эффективность данного метода, необходимо было проверить реакцию организма человека и опорно-двигательного аппарата, в частности, на вертикальное вывешивание. Для оценки реакции организма были определены биомеханические характеристики локомоций (ходьбы) человека, а именно угловые скорости в суставах нижней конечности.

Исследование было проведено на базе НИИ космической медицины ФНКЦ ФМБА России в 2018-2019 гг. с участием 24 обследуемых. Обследуемые — здоровые мужчины в возрасте от 20 до 36 лет $(25,1 \pm 5,2 \, \text{года})$, массой тела от 72

до 90 кг (78,5 \pm 6,6 кг), ростом от 172 до 192 см (179,7 \pm 6,3 см). Все добровольцы перед началом исследования прошли медицинское освидетельствование и в соответствии с Хельсинкской декларацией подписали Информированное согласие на участие в данном исследовании, что соответствует общепринятым требованиям к организации такого рода научных исследований [9].

Регистрировали биомеханические характеристики ходьбы на беговой дорожке «H/P/Cosmos Mercury 4.0» (H/P/Cosmos sports & medical GMBH, Germany) в темпе 90 шагов/мин. Каждый испытатель выполнял 2 вида локомоторного теста:

- 100 % массы тела обследуемого. При данной весовой нагрузке на опорно-двигательный аппарат ходьба соответствовала земным условиям;
- 37,83 % массы тела обследуемого (принято округленное до целых чисел значение, равное 38 %). Весовая нагрузка соответствовала нахождению человека на поверхности Марса;
- 16,52 % массы тела обследуемого (принято округленное до целых чисел значение равное 17 %). Весовая нагрузка соответствовала пребыванию человека на поверхности Луны.

Определение массы тела обследуемого перед исследованием каждого вида ходьбы проводили с использованием тензометрических платформ Kistler (Kistler Group, Швейцария), установленных под полотном беговой дорожки. Создание и регулирование различной весовой нагрузки на опорно-двигательный аппарат проводили с использованием системы вертикального вывешивания H/P/Cosmos-Airwalk (H/P/Cosmos sports & medical GMBH, Германия), состоящей из воздушного компрессора, рамной конструкции и специального жилета.

Биомеханические характеристики ходьбы регистрировали и анализировали с использованием аппаратно-программного комплекса «Видеоанализ-Биософт-3D» (научно-медицинская фирма «Биософт», Россия) в полном соответствии с методикой, предложенной авторами при исследовании биомеханических характеристик локомоций космонавтов до и после длительных космических полетов [10]. Для регистрации движений в суставах нижней конечности и определения угловых скоростей на проекции суставов фиксировали светоотражающие маркеры. Маркер тазобедренного сустава располагали в области проекции наиболее выступающей части большого вертела, коленного - на 2 см выше латеральной суставной щели. При регистрации движений в голеностопном суставе нижний край маркера совпадал с нижним краем латеральной лодыжки. Маркер для дистальной части стопы устанавливали в области головки 5-й плюсневой кости. Регистрировали углы в суставах нижней конечности: тазобедренном - между продольными осями туловища и бедра со стороны вентральной

поверхности тела; коленном — между продольными осями бедра и голени с дорсальной стороны; голеностопном — между продольными осями голени и стопы со стороны передней поверхности голени и тыльной поверхности стопы.

Тело обследуемого рассматривали как плоскую четырехзвенную модель, соединяющую 5 основных точек: акромион лопатки (acromion), большой вертел (trochanter major), латеральный надмыщелок (epicondylis lateralis), латеральную лодыжку (malleolus lateralis), 3-ю фалангу пальца левой ноги на сагиттальной плоскости тела. Сегменты тела обследуемого в нашей модели считали недеформируемыми, суставы заменяли шарнирами без трения (идеальными), масс-инерционные характеристики испытуемого во время испытания являлись неизменными.

Первая гипотеза — при разгрузке опорно-двигательного аппарата человека создается виртуальная реальность, воссоздающая условия пребывания в среде с измененной силой тяжести, в которой биомеханические характеристики локомоций будут отвечать уровню воссозданной виртуальной силы тяжести.

Для подтверждения данной гипотезы было рассмотрено движение нижней конечности в момент фазы шага, когда нижняя конечность совершает движение из своего максимально поднятого состояния, которому соответствует временной интервал от момента отрыва стопы при завершении фазы заднего толчка до момента прохождения стопы маховой ноги в плоскости опорной стопы. В данном случае движение нижней конечности можно сопоставить с движением физического маятника, выведенного из состояния равновесия в поле силы тяжести [11, 12]. В момент, когда физический маятник проходит через вертикальную плоскость, достигается максимально возможная угловая скорость колебательного движения – ϖ . Эту скорость можно вычислить с использованием формулы

$$\varpi = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (1)$$

где l — приведенная длина физического маятника; g — ускорение свободного падения на небесных телах (Земле, Луне, Марсе).

Если рассматривать колебания физического маятника в разных полях силы тяжести, то можно записать соотношение максимальных значений угловых скоростей как формулу

$$\frac{\varpi_1}{\varpi_2} = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \tag{2}$$

где g — ускорение свободного падения на небесных телах (Земле, Луне, Марсе); индексы 1 и 2 отвечают

Таблица 1

Соотношение угловых скоростей и ускорений свободного падения в разных гравитационных условиях

Соотношения	Теоретическое вычисление	Экспериментальное вычисление	Разница между теоретическими и экспериментальными величинами, %
<u>Земля</u> Марс	$\sqrt{\frac{g_{\text{3eMNR}}}{g_{\text{Mapc}}}} = 1,63$	$\frac{\varpi_{\text{3eM/NR}}}{\varpi_{\text{Mapc}}} = 1,79 \pm 0,33$	+9,82
<u>Земля</u> Луна	$\sqrt{\frac{g_{3\text{емля}}}{g_{\text{Луна}}}} = 2,46$	$\frac{\varpi_{\text{Земля}}}{\varpi_{\text{Луна}}} = 2,66 \pm 0,31$	+8,13
<u>Марс</u> Луна	$\sqrt{\frac{g_{Mapc}}{g_{Л_{YHa}}}} = 1,51$	$\frac{\varpi_{Mapc}}{\varpi_{Луна}} = 1,44 \pm 0,16$	-4,64

гравитационным условиям для лунной и марсианской силы тяжести.

В табл. 1 приведены результаты расчета отношений максимальных угловых скоростей для тазобедренного сустава (скорости рассчитаны экспериментально методом видеоанализа движений) и отношения ускорений свободного падения на Земле, Марсе, Луне.

Выполненные расчеты показывают незначительную разницу между соотношениями, вычисленными теоретически и вычисленными на основании экспериментальных результатов, полученных методом видеоанализа движений. Опорно-двигательный аппарат человека адекватно воспринимает созданный нами элемент виртуальной реальности, в котором моделируются измененные гравитационные условия. Таким образом, моделирование локомоций человека с использованием вертикального вывешивания применительно к пребыванию на поверхности других небесных тел (Луна, Марс), уровень гравитации которых отличен от земного, является информативным методом и адекватно воспроизводит изменения биомеханических параметров локомоций в условиях измененной гравитационной нагрузки на опорно-двигательный аппарат.

Вторая гипотеза — при разгрузке опорно-двигательного аппарата человека методом вертикального вывешивания создается среда виртуальной реальности, в которой воспроизводятся условия пребывания в среде с измененной силой тяжести. При этом справедливо ожидать увеличения допускаемых при реализации локомоций ошибок, и чем больше величина разгрузки, тем больше относительная величина ошибки.

Необходимость определения величины относительной ошибки обусловлена тем, что абсолютную ошибку изменения углов в суставах нижней конечности при разных уровнях гравитационной разгрузки нельзя сопоставить, поскольку чем больше разгрузка опорно-двигательного аппарата, тем меньше изменения амплитуды угловых перемещений в суставах [13]. Для расчета относительной ошибки нами была предложена формула

$$\xi = \int \frac{\sigma(t)dt}{\int (\alpha(t) - \alpha(\min))dt} , \qquad (3)$$

где $\sigma(t)$ — функция зависимости стандартного отклонения от времени шага.

Описание расчетов представлено на рисунке.

Величина стандартного отклонения за время двойного шага определялась в каждой *i*-й точке траектории. В связи с вариативностью кинематических характеристик шага при обработке данных сначала анализировали параметры 10–12 последовательных шагов, принимая их за 100 % и переходя, таким образом, от абсолютных временных величин к относительным. В каждой i-й точке значения полученных характеристик усредняли.

Интеграл $\int \sigma(t)dt$ позволяет найти площадь между 2 кривыми $(\alpha+\sigma)$ и $(\alpha-\sigma)$ и определить абсолютную погрешность за все время двойного шага. Интеграл $\int (\alpha(t)-\alpha(\min))dt$ — позволяет определить площадь, сверху ограниченную функцией угла в суставе от времени $\alpha(t)$, а снизу ограниченную минимальным углом в суставе $\alpha(\min)$.

Таким образом, мы определяем абсолютный объем движения для *i*-го сустава и вариативность движений в суставе. Этот объем изменяется в зависимости от величины разгрузки опорно-двигательного аппарата. В табл. 2 представлены соотношения между относительными ошибками в суставах при выполнении ходьбы с различной гравитационной разгрузкой опорно-двигательного аппарата.

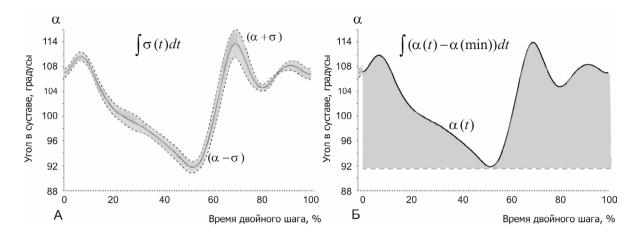


Рисунок. Расчет величины относительной ошибки изменения углов в суставе в цикле двойного шага: А – расчет площади между 2 кривыми (α + σ) и (α - σ); Б – расчет площади, сверху ограниченной функцией угла в суставе α (min). Расчет проведен на примере голеностопного сустава. Серым цветом показана площадь вычисляемых величин

Таблица 2

Соотношение между относительными ошибками в суставах при выполнении ходьбы с различной гравитационной разгрузкой ОДА

Сустав	^ξ луна / ^ξ Земля	^ξ марс / _{ξ3емля}
Голеностопный	2,63	2,01
Коленный	1,89	1,43
Тазобедренный	1,94	1,72

Для всех суставов нижней конечности наблюдается более высокая погрешность в движениях при разгрузке опорно-двигательного аппарата относительно таковых в условиях без вывешивания (нормальная ходьба). Полученные результаты подтверждают выдвинутую нами гипотезу: чем больше величина гравитационной разгрузки опорно-двигательного аппарата при выполнении локомоций, тем менее организм приспособлен к таким условиям. Справедливо предположить, что организм человека в условиях вертикального вывешивания будет воспринимать созданные условия виртуальной реальности как истинное изменение силы тяжести.

Выводы

1. Моделирование локомоций человека с использованием вертикального вывешивания применительно к пребыванию в различных гравитационных условиях является информативным методом и адекватно воспроизводит изменения биомеханических параметров локомоций.

2. Выполнение локомоций в условиях вертикального вывешивания воспринимается человеком как выполнение локомоций в условиях измененной силы тяжести с заданной величиной гравитационной разгрузки.

По результатам выполненных исследований коллективом авторов получено авторское свидетельство «Способ и биомеханическое обоснование создания дополнительного элемента виртуальной реальности, связанного с моделированием измененной силы тяжести», регистрационный номер 887-141-604 в Национальном реестре интеллектуальной собственности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-315-20010.

Список литературы

1. Что такое виртуальная реальность VR? URL: https://make-3d.ru/ (дата обращения: 17.07.2019).

What is virtual reality VR? URL: https://make-3d.ru/(accessed: 07/17/2019).

2. Панкратов А.В. О различном понимании термина «виртуальная реальность» // Виртуальные реальности. Труды лаборатории виртуалистики. 1998. Вып. 4. С. 116–122.

Pankratov A.V. About the different understanding of the term «virtual reality» // Virtual'nye real'nosti. Trudy laboratorii virtualistiki. 1998. Is. 4. P. 116–122.

- 3. Ganesan M., Sathyaprabha T.N., Gupta A., Kumar Pal P. Effect of partial weight supported treadmill gait training on balance in patients with parkinson disease // J. of Injury, Function and Rehabil. 2014. V. 6. P. 22–33.
- 4. Walker M.L., Ringleb S.I., Maihafer G.C. et al. Virtual reality—enhanced partial body weight—supported treadmill training poststroke: feasibility and effectiveness in 6 subjects // Arch. of Physical Med. and Rehabil. 2010. V. 91. P. 115–122.
- 5. *Masumotoa K., Joergerb J., Mercerb J.A.* Influence of stride frequency manipulation on muscle activity during running with body weight support // Gait & Posture. 2018. V. 61. P. 473–478.
- 6. Lewek M.D. The influence of body weight support on ankle mechanics during treadmill walking // J. of Biomechanics. 2011. V. 44. P. 128–133.
- 7. Saenko D.G., Artamonov A.A., Kozlovskaia I.B. Characteristics of postural corrective responses before and after long-term spaceflight // Fiziologiia Cheloveka, 2011. V. 37 (5). P. 91–99.
- 8. Lacquaniti F., Ivanenko Y.P., Sylos-Labini F. et al. Human locomotion in hypogravity: from basic research to clinical applications // ibid. P. 893–911.
- 9. Смирнова Т.А., Ильин Е.А. Этика проведения биомедицинских исследований и испытаний // Авиакосм. биол. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 4. С. 59–68.

Smirnova T.A., Ilyin E.A. Ethics of biomedical investigations and tests // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 4. P. 59–68.

10. Шпаков А.В., Воронов А.В., Фомина Е.В. и др. Сравнительный анализ эффективности различных режимов локомоторных тренировок в длительных космических полетах по данным биомеханических и электромиографических характеристик ходьбы // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 2. С. 60–69.

Shpakov A.V., Voronov A.V., Fomina E.V. et al. Comparative efficiency of different regimens of locomotor training in prolonged space flights as estimated from the data on biomechanical and electromyographic parameters of walking // Fiziologiya cheloveka. 2013. V. 39. № 2. P. 60–69.

11. Awrejcewicz J., Supel B., Lamarque C. et al. Numerical and experimental study of regular and chaotic motion of triple physical pendulum // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 2008. V. 10. P. 2883–2915.

12. Мельник К.А., Артамонов А.А., Миллер Т.Ф., Воронов А.В. Влияние механической стимуляции опорных зон стоп во время 7-суточной сухой иммерсии на кинематические параметры локомоций человека // Авиакосм. и экол. мед. 2006. Т. 40. № 5. С. 61–65.

Melnik K.A., Artamonov A.L., Miller T.F., Voronov A.V. Effects of mechanic stimulation of the foot support zones on locomotion kinematics during 7-day dry immersion // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2006. V. 40. $N_{\rm S}$ 5. P. 61–65.

13. Шпаков А.В., Воронов А.В. Особенности организации ходьбы человека в условиях различной по величине гравитационной нагрузки на опорно-двигательный аппарат // Там же. 2017. Т. 51. № 7. С. 38–47.

Shpakov A.V., Voronov A.V. Peculiarities of human walking under different level of gravitational loading on musculoskeletal system // Ibid. 2017. V. 51. Nº 7. P. 38–47.

Поступила 05.08.2019

VERTICAL SUSPENSION AS A VIRTUAL REALITY COMPONENT DURING HUMAN LOCOMOTION

Artamonov A.A.¹, Orlov D.O.¹, Puchkova A.A.¹, Shpakov A.V.¹, Voronov A.V.²

¹Research Institute for Space Medicine of Federal Research Clinical Center of Federal Biomedical Agency of Russia, Moscow

²Federal Research Center of Physical Education and Sports, Moscow

Experimental calculation of angular velocities in the lower limb was made based on analysis of video recorded walking under different degrees of musculoskeletal unloading in order to verify the method of vertical suspension as a virtual reality element. The resulted angular velocity relations were compared to the relations of free fall accelerations in the gravity conditions on Earth, Mars and the Moon. Additional analysis of the locomotion error from angular displacement amplitudes showed an inappreciable difference of calculated and theoretical velocity relations. Variability of walking biomechanics is dependent on the degree of gravitational unloading.

Key words: virtual reality, vertical suspension, locomotion, gravitational unloading, angular velocities of the lower limb joints.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 60–64.

УДК 693.3

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АДЕКВАТНОГО ВЫХОДА ИЗ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ В ВЫСОТНОМ ПОЛЕТЕ

Шишов А.А.^{1, 2}, Богомолов А.В.¹

¹Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны России, Москва

E-mail: aashishov@yandex.ru; a.v.bogomolov@gmail.com

По результатам анализа летных инцидентов в высотных полетах, данных литературы и собственных научных исследований выполнено физиологическое обоснование рациональных путей адекватного выхода летного состава из аварийной ситуации в высотном полете. Показана высокая значимость правильного выбора, подгонки и эксплуатации высотного снаряжения и кислородно-дыхательной аппаратуры, а также реализации психофизиологической подготовки к высотным полетам. Обосновано, что последствия высотной гипоксии устраняются при быстром спуске до высоты 4000 м и менее, а высотные декомпрессионные расстройства в большинстве случаев ослабевают при замедлении или прекращении подъема (спуска), развитие признаков высотной декомпрессионной болезни у летчика в полете требует моментального спуска с высоты с последующим завершением полета. Приоритетным направлением повышения эффективности психофизиологической подготовки к высотным полетам является ее реализация применительно к характеру предстоящего выполняемого полетного задания и в зависимости от типа эксплуатируемого летательного аппарата.

Ключевые слова: высотный полет, гипоксия, высотные декомпрессионные расстройства, гермокабина, высотные средства жизнеобеспечения, декомпрессия, разгерметизация.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. T. 54. № 2. C. 65-71.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-65-71

Приоритетами авиационной медицины были и остаются обеспечение безопасности полетов, повышение эффективности применения авиационной техники и надежности профессиональной деятельности, сохранение профессионального здоровья и увеличение профессионального долголетия летного состава. Решение этих задач требует физиологического обоснования адекватного действия летного состава в экстремальных ситуациях высотного полета, в том числе в условиях гипобарической гипоксии, которая возникает в высотных полетах при аварийных ситуациях и в ряде источников называется «высотная гипоксия» [1–10].

Частой причиной развития опасной ситуации в высотном полете является неадекватное условиям полета кислородное обеспечение из-за нарушения летным составом правил эксплуатации кислородно-дыхательной аппаратуры и высотного снаряжения или их неисправности. Факторами, усугубляющими исход авиационного инцидента, становится нераспознавание летчиками своего гипоксического состояния и непринятие мер по выходу из аварийной ситуации, а также выполнение ошибочных действий в этих условиях [5–8].

Ошибочные действия экипажей летательных аппаратов (ЛА) в гипоксической ситуации имеют общие черты в более чем столетней истории высотных полетов. Так в полете на воздушном шаре «Зенит» в 1875 г. французские аэронавты Зивель и Кросс-Спинелли, находясь на высоте 7500 м в состоянии острой гипоксии, вместо уменьшения высоты полета или перехода на дыхание кислородом сбросили балласт и поднялись еще выше (до 8600 м), что привело к их гибели [11].

В высотном полете (полеты на высотах 4000 м и более) с обязательным использованием высотных средств жизнеобеспечения (ВСОЖ) — гермокабин, кислородно-дыхательного оборудования, высотного снаряжения — эпизодически происходят различные аварийные ситуации, изменяющие самочувствие летчика и нарушающие его работоспособность вследствие развития высотных нарушений [6, 8].

Наиболее частые высотные нарушения — высотная гипоксия и высотные декомпрессионные расстройства (ВДР). По скоротечности развития нарушения сознания и работоспособности наиболее опасным неблагоприятным фактором для летного состава представляет высотная гипоксия. ВДР могут возникнуть самостоятельно или в сочетании с высотной гипоксией и, как правило, не представляют прямой мгновенной угрозы для жизнедеятельности экипажу ЛА [4, 5, 12].

В высотном штатном режиме полета давление в гермокабине ЛА может достигать величин, эквивалентных давлению на высотах до 7000–8000 м.

²Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

При технических неисправностях или неправильном использовании ВСОЖ прекращается (снижается) дополнительное поступление кислорода в организм: возникает реальная угроза развития у летчика острой гипоксии, нарушающей сознание и работоспособность и приводящей к невыполнению полетного задания, возможной потери ЛА и гибели экипажа.

При анализе летных инцидентов, происходящих в высотных полетах, нередко выявляются неправильные действия летчика по выходу из возникшей гипоксической ситуации. Несмотря на ухудшение самочувствия, летчики продолжают набор высоты, не предпринимают мер по устранению гипоксического состояния — подача на дыхание 100 % кислорода, плотная фиксация кислородной маски на лице. Все это усугубляет тяжесть гипоксии, приводит к нарушению работоспособности и сокращению резервного времени экипажа ЛА [4, 5, 13—15].

Симптоматика, тяжесть течения, степень нарушения работоспособности и исход высотной болезни зависят от высоты и скорости подъема, длительности и повторности экспозиции, исходного состояния организма, индивидуальной высотной устойчивости, характера и интенсивности выполняемой на высоте работы. В развитии высотной болезни выделяют 4—6 стадий гипоксического состояния, из которых основными являются: скрытая стадия, стадия приспособительных реакций (компенсации), стадия выраженных нарушений (декомпенсации), стадия восстановления или при продолжении воздействия — терминальная, критическая стадия.

Скрытая стадия выявляется на высотах до 3000 м при дыхании воздухом или на высотах 10 500—11 500 м при дыхании кислородом только при выполнении физической работы или функциональных нагрузочных проб.

В стадии приспособительных реакций при длительном (1–2 ч и более) пребывании на высотах 3000–5000 м или в первые 3–5 мин экспозиции на высотах 6000–7000 м при дыхании воздухом или на эквивалентных высотах (11 500–12 800 и 13 000–13 800 м соответственно) при дыхании кислородом организм компенсирует кислородный дефицит усилением деятельности «транспортных» систем – дыхания и сердечно-сосудистой, а также за счет повышения тонуса нервных центров, регулирующих эти системы.

В стадии компенсации у человека чаще всего развивается выраженное возбуждение. Кожа лица розовеет, глаза блестят, может отмечаться приподнятое настроение (эйфория), излишняя жестикуляция, словоохотливость, смешливость. Движения становятся размашистыми, тонкая координация нарушается, снижается острота зрения. При этом наблюдается неадекватное отношение человека к окружающей обстановке, ситуации полета,

собственному состоянию, продуктивность работы может повышаться при одновременном снижении ее качества.

В условиях относительно ллительного (30-10 мин) пребывания на высотах 6000-7000 м при дыхании воздухом или на высотах 13 000-13 800 м при дыхании кислородом приспособительные реакции становятся недостаточно эффективными. Вследствие выраженного кислородного голодания развивается стадия патологических нарушений (декомпенсации). Начальное возбуждение сменяется заторможенностью, появляется одышка, ощущение тяжести в голове, головокружение, головная боль, «приливы» тепла к голове, холодный липкий пот на лице и ладонях, ухудшается зрение. Движения становятся вялыми и замедленными, умственная и физическая работа требует волевых усилий, продуктивность и качество операторской деятельности снижается на 30-50 %. Речь становится прерывистой, заторможенной и неразборчивой (на это следует обратить внимание руководителю полетами). Возможно развитие клонических судорог, особенно работающих мышц; отмечается доминирование на электроэнцефалограмме медленных волн, урежение пульса, снижение артериального давления.

Критическая (терминальная) стадия гипоксического состояния может наступать на высотах 6000-7000 м при экспозиции соответственно более 30-10 мин, а на высотах 8000-11 000 м и более при дыхании воздухом или на 14 000 м и более при дыхании кислородом - через несколько минут или даже секунд. В этот период происходит декомпенсация сердечной деятельности, развиваются общие тонические судороги, иногда отмечаются резкие зрительные нарушения (появление серой или черной пелены), теряется сознание, угасает биоэлектрическая активность мозга, прекращается дыхание и останавливается сердце. При пролонгировании экспозиции в указанных экстремальных условиях развиваются структурные повреждения клеток и тканей.

По характеру симптомов и времени их появления в критической стадии высотную болезнь разделяют на 2 клинические формы — коллаптоидную и обморочную.

Коллаптоидная форма развивается при длительном (минуты, часы) пребывании на высотах 5000—7000 м при дыхании воздухом или на высотах 12 500—13 500 м при дыхании кислородом. Она характеризуется прогрессивным ухудшением самочувствия и нарастанием симптоматики кислородного голодания, завершающемся резким урежением пульса (брадикардия), выраженным снижением системного артериального давления, помрачнением сознания, полным нарушением работоспособности.

Вторая форма гипоксии критической стадии – высотный обморок – возникает обычно при более

выраженном и остро наступающем дефиците кислорода (при прекращении дополнительного питания кислородом на высотах 8000—12 000 м, при быстром, за несколько секунд, подъеме на эти высоты при дыхании воздухом и на высоты 14 000—15 000 м при дыхании кислородом). Высотный обморок проявляется внезапной потерей сознания, часто без выраженных предвестников ухудшения самочувствия и общего состояния, на фоне повышенной легочной вентиляции, тахикардии, умеренной гипертензии и судорожных подергиваний отдельных групп мышц (лица, кисти).

Правильными действиями экипажа по выходу из этой аварийной ситуации являются быстрый спуск на высоты 3000—4000 м, доклад руководителю полетами, проверка и восстановление эффективной работоспособности ВСОЖ. Определенным подспорьем для правильных действий летного состава в этой ситуации могут быть навыки, приобретенные при прохождении ознакомительных подъемов в барокамере по распознаванию высотной гипоксии по ощущениям при дозированном кислородном голодании на высотах 5000—6000 м по 5 мин [9, 16].

Следует добавить, что в осложненном высотном полете острая гипоксия, со всеми вытекающими последствиями, может развиться и при разгерметизации герметической кабины ЛА на высоте до 12 000 м, если по тем или иным причинам прекращается поступление кислорода в организм человека. Естественно, что рекомендации по адекватному выходу из аварийной ситуации и оценка значимости предварительных ознакомительных барокамерных подъемов по распознаванию гипоксического состояния также будут эффективны и в этом случае [9, 16].

В полетах на высотах более 12 000 м в качестве защитных средств используются комплекты кислородного оборудования (ККО) для дыхания под избыточным давлением. При разгерметизации кабины ЛА в снаряжении летчика и в легких автоматически создается избыточное давление, что эффективно предупреждает развитие гипоксии при воздействии декомпрессии на высотах свыше 12 000 м. Вместе с тем высотное снаряжение с избыточным давлением становится жестким, тугоподвижным, вызывая значительные затруднения дыхания и речи, а также затруднение выполнения рабочих движений при пилотировании ЛА. Затруднение дыхания возникает еще из-за особенностей срабатывания ККО – избыточное давление в снаряжении создается на 2-3 с раньше, чем в легких. Кроме того, при срабатывании ККО давление в снаряжении всегда достигает практически максимальных значений, независимо от высоты и скорости декомпрессии.

Разгерметизацию кабины ЛА на высотах более 12 000 м можно распознать не только по слуховым и зрительным эффектам декомпрессии (резкий шум, громкий хлопок наподобие взрыва, пыль и туман

в кабине, охлаждение), но также и по ощущениям от резкого сдавливания тела высотным компенсирующим костюмом (ВКК), затруднению дыхания и движений, возникающих при создании избыточного давления в ККО.

Опасаться этого временного дискомфорта не следует — через 3—5 с соотношение давления в легких и на область тела выравнивается и приходит к адекватному на текущей высоте полета. Дискомфортные ощущения уменьшаются, летчик может спокойно оценить обстановку и благополучно завершить полет, что является правильным действием по выходу из аварийной ситуации высотного полета [6, 17, 18].

Отмеченные особенности штатной работы комплекта ВСОЖ при разгерметизации кабины ЛА на высотах более 12 000 м требуют особого подхода к проведению психофизиологической подготовки к таким видам высотных полетов. Эта задача успешно решается путем проведения предварительных ознакомительных барокамерных подъемов на высоту 13 500 м, в которых моделируются основные неблагоприятные факторы, возникающие при разгерметизации герметической кабины ЛА на высотах более 12 000 м в реальном полете.

В процессе обоснования ознакомительных барокамерных подъемов летного состава на высоту 13 500 м главными критериями являлись информативность, наглядность, возможность моделирования отдельных компонентов взрывной декомпрессии и максимум безопасности.

При быстрой разгерметизации кабины ЛА происходит взрывная декомпрессия (падение давления за время менее 1 с). Как следствие воздух в легких и в желудочно-кишечном тракте расширяется мгновенно. Летчик может почувствовать резкий толчок в области груди и живота, выход «горячего» воздуха изо рта и носа, выброс слизи из носоглотки, вибрацию губ и щек, непроизвольное отхождение газов и др. Все это может вызвать нервно-психическое напряжение и нарушение работоспособности неподготовленного летчика.

Следовательно, возможный фактор взрывной декомпрессии, как и полеты на высотах свыше 12 000 м, требуют особенно тщательной психофизиологической подготовки, контроля и эксплуатации высотного снаряжения, а также проведения обучения дыханию и речи под избыточным давлением, ознакомительных подъемов на высоту 13 500 м, которые помогут летчику в реальном полете справиться с неизбежным в этом случае эмоциональным стрессом [6–9, 16–22].

Многолетний опыт применения разработанной системы защиты летного состава от неблагоприятного воздействия факторов высотного полета и опыт проведения психофизиологической подготовки к этим полетам показал высокую эффективность

и надежность ВСОЖ, позволившего окончательно преодолеть «психофизиологический барьер» стратосферы. Однако это не означает, что проблема безопасности высотных полетов и подготовки летного состава к их выполнению решена полностью и окончательно. Эпизодически в летных частях случаются тяжелые летные происшествия или предпосылки к ним, связанные, прежде всего, с нарушением работоспособности экипажа вследствие развития кислородного голодания в высотном полете. При анализе подобных происшествий отмечено, что их причиной обычно являются нарушения правил эксплуатации высотного снаряжения и кислородного оборудования, его технические неисправности и незнание летным составом мер по устранению гипоксии в полете.

Наиболее опасными отказами ВСОЖ в полете, а также наиболее характерными нарушениями правил эксплуатации высотного снаряжения и кислородного оборудования являются:

- разгерметизация кабины, приводящая к декомпрессии (плавной или взрывной);
- использование снаряжения, не соответствующего высоте полета;
- взлеты без кислородной маски, со снятой или плохо фиксированной на лице кислородной маской, с открытым щитком гермошлема, со слабым подтягом гермошлема, с неподсоединенной кислородной маской компенсатору натяга защитного шлема или высотного компенсирующего костюма к объединенному разъему;
- вылеты с закрытым вентилем подачи кислорода или с недостаточными запасами кислорода;
- вылеты с неподсоединенными к кислородному прибору кислородной маской или гермошлемом;
- невыполнение предполетной проверки кислородного оборудования и высотного снаряжения.

При этом следует отметить ряд важных особенностей, повышающих риск подобных аварийных ситуаций и риск несвоевременности их распознавания в полете:

- редкие отказы снижают настороженность экипажа;
- незначительное число высотных полетов у каждого летчика не позволяет сформировать устойчивый навык рационального распределения внимания между процессом пилотирования и контролем за ВСОЖ;
- недостаточная информативность сенсорных признаков отказов ВСОЖ или их опасная схожесть, как, например, гипоксии с признаками утомления, а ВДБ с дискомфортом от высотного снаряжения;
- недостаточно эффективная визуальная система контроля за режимами работы кислородно-дыхательной аппаратуры и высотного снаряжения и отсутствие надежной системы сигнализации нарушения работы ВСОЖ в полете;

 - «коварность» течения выраженных степеней гипоксии, при которой летчик теряет способность критически оценивать создавшиеся условия и принимать адекватные решения по выходу из опасной ситуации.

Служебная недисциплинированность, недостаточный уровень профессиональной подготовки к действиям в нештатных условиях полета, завышение оценок истинного профессионального умения, излишняя самоуверенность — основные моменты, приводящие к ошибочным действиям летчика и повышению аварийности в высотных полетах [20–23].

Как отмечено, вариант ВДР — барокавепатия (за исключением баротравмы легких) хотя и вызывает нарушение самочувствия и работоспособности, прямой угрозы для жизни экипажа самолета не представляет. Это объясняется в том числе следующими обстоятельствами: большинство барокавепатий развиваются с ясно выраженными симптомами: вздутие, урчание, боль в животе при высотном метеоризме, дискомфорт, заложенность и боль в ушах, придаточных пазухах носа, зубная боль при бароотопатии, баросинусопатии, бароденталгии соответственно. Упомянутые симптомы появляются или в начале подъема на высоту (при высотном метеоризме, баросинусопатии и бароденталгии), или при спуске с высоты (чаще при бароотопатии).

Профилактика рассмотренных декомпрессионных нарушений основана на лечении воспалительных процессов в носоглотке, санации зубов, своевременном выявлении при предполетном осмотре лиц с острыми респираторными заболеваниями и лиц с пониженной переносимостью декомпрессионных воздействий при барокамерных подъемах.

Баротравма легких (БЛ) встречается довольно редко, исключительно при мгновенной (взрывной) разгерметизации кабины ЛА, и относительно легко предупреждается при правильном выборе и подгонке высотного снаряжения. Профилактика развития БЛ обеспечивается подгонкой ВКК в области груди с помощью шнуровки, создавая небольшое ограничение экскурсии грудной клетки в конце глубокого вдоха: жизненная емкость легких при этом уменьшается на 200—300 мл.

Высотная декомпрессионная болезнь (ВДБ) — патологическое состояние, развивающееся вследствие нарушения кровообращения и деформации тканей газовыми пузырьками, образующимися в крови, лимфе и тканях на высоте при снижении давления. ВДБ может развиться в полете и при подъемах в барокамере на высоты 6000—7000 м и более. Клиника ВДБ разнообразна — от кожных нарушений (зуд, парастезии, мраморность, отек, сыпь), мышечно-суставных болей до боли, жжения за грудиной, кашля, удушья, брадикардии, падения артериального давления, неврологических и циркуляторных нарушений.

Такая группа ВДР, как ВДБ, требует моментального спуска с высоты при малейших симптомах и степенях ее проявления, так как нет гарантии, что легкая форма и степень сразу не перерастут в тяжелую клиническую форму и степень. Симптомы ВДБ, не исчезающие даже после нормализации давления (спуск на землю, компрессия до 750 мм рт. ст.), подлежат купированию методом рекомпрессии воздухом или проведением гипербарической оксигенации, пострадавшему назначается постельный режим.

Разновидностью ВДР является высотная парогазовая эмфизема — нарушение, связанное с кипением жидких сред организма при снижении давления до уровня упругости насыщенных паров при температуре тела, т.е. до 47 мм рт. ст. и менее (высота 19 200 м и более). Высотная парогазовая эмфизема вызывает опасение возможного высотного кипения в областях перикарда, желудочков, правого предсердия, что может блокировать работу сердца и циркуляцию крови, как это имеет место при тампонаде сердца.

В стратосферных и барокамерных подъемах на большие высоты защита от высотной парогазовой эмфиземы эффективно обеспечивается техническими средствами, создающими давление на тело более 47 мм рт. ст., — герметические кабины, скафандры, герметические шлемы, высотные компенсирующие костюмы, компенсирующие перчатки и носки.

Таким образом, общей задачей высотной подготовки летного состава является обеспечение качественного выполнения полетного задания, поддержания высокой профессиональной работоспособности, сохранение здоровья, обучение и тренировка навыкам по выходу из аварийных нештатных ситуаций и обеспечение безопасности летной деятельности при действии высотных факторов полета. Психофизиологическая подготовка направлена на повышение психофизиологической устойчивости и функциональных резервов организма, предупреждение неблагоприятного влияния высоты, сохранение здоровья и продление летного долголетия и в конечном счете на повышение безопасности высотных полетов.

Выводы

1. Предупредить авиационный инцидент, найти правильный выход из аварийной гипоксической ситуации экипаж ЛА может только при неукоснительном выполнении инструкций и методических указаний по выбору, подгонке и эксплуатации высотного снаряжения и кислородно-дыхательной аппаратуры, по предполетной проверке и контролю их работы в полете, а также при умелых и грамотных действиях по выходу из нештатной ситуации высотного полета, т.е. при эффективном использовании

знаний и навыков, полученных в процессе психофизиологической подготовки к высотным полетам.

- 2. Адекватным выходом из аварийной гипоксической ситуации в полете является доклад руководителю полетами, максимально возможный быстрый спуск на высоты до 3000—4000 м, восстановление кислородного обеспечения организма проверка и восстановление работоспособности ВСОЖ, при необходимости снижение и выполнение посадки.
- 3. При многих высотных декомпрессионных расстройствах правильный выход из аварийной ситуации заключается в максимально возможном замедлении подъема (снижения), что обычно вызывает ослабление развившегося симптома. Развитие признаков высотной декомпрессионной болезни у летчика в полете требует моментального спуска с высоты при малейших симптомах и степенях ее проявления.
- 4. Приоритетным направлением повышения эффективности психофизиологической подготовки к высотным полетам является проведение подготовки летного состава применительно к характеру предстоящего выполняемого полетного задания и в зависимости от типа эксплуатируемого ЛА.

Исследование выполнено при государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации, грант № НШ-2553.2020.8.

Список литературы

1. Разумов А.Н., Пономаренко В.А. Теория и практика восстановительной медицины. М., 2015.

Razumov A.N., Ponomarenko V.A. Theory and practice of restorative medicine. Moscow, 2015.

2. *Малкин В.Б.* Барометрическое давление, газовый состав // Основы космической биологии и медицины. Т. 2. Кн. 1. М., 1975. С. 11-73.

Malkin V.B. Barometric pressure, gas composition // Fundamentals of space biology and medicine. V. 2. Ch. 1. Moscow, 1975. P. 11–73.

3. Сеченов И.М. О напряжении кислорода в легочном воздухе при различных условиях // Врач. 1880. Т. 1. N 43. С. 703—705.

Sechenov I.M. On the oxygen tension in pulmonary air under various conditions // Vrach. 1880. V. 1. N° 43. P. 703–705.

4. *Степанов В.К., Федорук Г.А., Дворников М.В.,* Щербинский В.В. Гипоксия — враг коварный // Авиация и космонавтика. 1989. № 6. С. 32—33.

Stepanov V.K., Fedoruk G.A., Dvornikov M.V., Shcherbinskiy V.V. Hypoxia is an insidious enemy // Aviatsiya i kosmonavtika. 1989. № 6. Р. 32–33.

5. *Ушаков И.Б.,* Черняков И.Н., Шишов А.А. Физиология высотного полета. М., 2007.

Ushakov I.B., Chernyakov I.N., Shishov A.A. Physiology of high-altitude flight. Moscow, 2007.

6. Черняков И.Н., Продин В.И., Шишов А.А. Диагностика гипоксии в полете // Авиация и космонавтика. 1991. № 11. С. 10-11.

Chernjakov I.N., Prodin V.I., Shishov A.A. Diagnosis of hypoxia in flight // Aviatsiya i kosmonavtika. 1991. № 11. P. 10–11.

7. *Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Богомолов А.В. и др.* Особенности поддержки принятия решений по устранению особых событий и опасных состояний летчика в высотном полете // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 6. С. 74–79.

Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V. et al. Features of decision support to eliminate special events and dangerous conditions of a pilot in high-altitude flight // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2009. № 6. P. 74–79.

8. *Черняков И.Н., Продин В.И., Шишов А.А*. О возможности распознавания гипоксии в высотном полете // Воен.-мед. журнал. 1991. № 7. С. 64–66.

Chernyakov I.N., Prodin V.I., Shishov A.A. On the possibility of recognizing hypoxia in high-altitude fligh // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 1991. № 7. P. 64–66.

9. Черняков И.Н., Шишов А.А. Барокамерные подъемы как метод психофизиологической подготовки летчиков к стрессовым ситуациям // Там же. 2005. № 7. С. 52–66.

Chernyakov I.N., Shishov A.A. Pressure chamber elevations as a method of psychophysiological preparation of pilots for stressful situations // Ibid. 2005. N_2 7. P. 52–66.

10. *Благинин А.А., Жильцова И.И., Емельянов Ю.А.* Вопросы декомпрессионной безопасности летного состава // Там же. 2017. Т. 338. № 7. С. 42–45.

Blaginin A.A., Zhil'tsova I.I., Emel'yanov Yu.A. Issues of decompression safety of flight personnel // Ibid. 2017. V. 338. \mathbb{N}° 7. P. 42–45.

11. Черняков И.Н. Среда обитания человека в авиации // Человек в измерениях XX века. Мелитополь, 2008. С. 43–100.

Chernjakov I.N. Man in the measurements of the twentieth century // Man in the dimensions of XX century. Melitopol', 2008. P. 43–100.

12. Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Чернуха В.Н. и др. Проблемы обеспечения безопасности высотных полетов при разгерметизации кабины // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 12. С. 29–35.

Dvornikov M.V., Kukushkin Yu.A., Chernukha V.N. et al. Safety problems of high-altitude flights during cabin depressurization // Problemy bezopasnosti poletov. 2014. \mathbb{N}° 12. P. 29–35.

- 13. Busby D.E. Space clinical medicine. Dordrecht, 1967.
- 14. *Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Богомолов А.В. и др.* Математическое обеспечение рискометрии состояний человека в экстремальных и аварийных ситуациях, сопряженных с гипоксическим воздействием // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 10. С. 25–33.

Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V. et al. Mathematical software for risk management of human conditions in extreme and emergency situations associated

with hypoxic exposure // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2012. № 10. P. 25–33.

15. *Матюшев Т.В., Дворников М.В., Богомолов А.В. и др.* Математическое моделирование динамики показателей газообмена человека в условиях гипоксии // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 4. С. 51–64.

Matjushev T.V., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V. et al. Mathematical modeling of the dynamics of a person's gas exchange under hypoxia // Matematicheskoe modelirovanie. 2014. V. 26. № 4. P. 51–64.

16. Дворников М.В., Меденков А.А., Степанов В.К. Выбор и подгонка защитного снаряжения. Обучение дыханию под избыточным давлением. М., 2001.

Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Stepanov V.K. Selection and fitting of protective equipment. Pressure breathing training. Moscow, 2001.

17. *Цивилашвили А.С., Черняков И.Н.* Влияние взрывной декомпрессии на организм животных и человека // Воен.-мед. журнал. 1961. № 9. С. 65–69.

Tsivilashvili A.S., Chernyakov I.N. The effect of explosive decompression on the body of animals and humans // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 1961. Nº 9. P. 65–69.

18. Дворников М.В., Воловик Ю.А., Матюшев Т.В. Поучительная история одного высотного полета: декомпрессионная болезнь у экипажа самолета и ее последствия // Там же. 2019. Т. 340. № 3. С. 50–54.

Dvornikov M.V., Volovik Yu.A., Matyushev T.V. The instructive story of one high-altitude flight: decompression sickness in an airplane crew and its consequences // Ibid. 2019. V. 340. \mathbb{N}° 3. P. 50–54.

- 19. Holm A.P., Freedman T., Puskas A. et al. Accidental decompression. A new philosophy for the transports of the seventies // Aerospace Med. 1970. V. 41. No 3. P. 277–282.
- 20. Пономаренко В.А. Психофизиологические основы подготовки летного состава к действиям в нестандартных ситуациях // Авиакосм. и экол. мед. 1992. Т. 26. № 3. С. 18–24.

Ponomarenko V.A. Psychophysiological basis for the preparation of flight personnel for action in non-standard situations // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1992. V. 26. № 3. P. 18–24.

21. Психофизиологическая подготовка летного состава. М., 1989.

Psychophysiological training of flight personnel. Moscow, 1989.

22. Пономаренко В.А. Страна Авиация — черное и белое. М., 1995.

Ponomarenko V.A. Country Aviation – black and white. Moscow, 1995.

23. 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. N_{2} 9. P. 45–50.

Поступила 27.03.2020

PHYSIOLOGICAL SUBSTANTIATION OF ADEQUATE EMERGENCY ESCAPE IN HIGH-ALTITUDE FLIGHT

Shishov A.A.^{1, 2}, Bogomolov A.V.¹

¹Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of Russia, Moscow

²Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Physiological substantiation of a rational escape of highaltitude contingency was made after analysis of the data about in-flight accidents, literature and authors' scientific researches. Of the highest criticality are correct choice, adjustment and use of flight gear and oxygen breathing apparatus, and appropriate psychophysiological training. It was demonstrated that consequences of altitude hypoxia can be eliminated by a rapid descent to 4000 m or lower; as a rule, altitude decompression disorders are relieved by slowdown or break-off of ascent (descent); appearance of decompression sickness symptoms must be responded by an immediate descent and landing. It is concluded that the way to improve effectiveness of pilot's psychophysiological training with account to character of impending flight task and type of aircraft.

Key words: high-altitude flight, hypoxia, altitude decompression disorders, pressurized cabin, high-altitude life support gear, decompression, loss of pressure.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 65–71.

УДК 613.693

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ПОЗВОНОЧНОГО СТОЛБА ЧЕЛОВЕКА НА УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Моисеев Ю.Б.

Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института ВВС Минобороны России, Москва

E-mail: ybmn@rambler.ru

Эксперименты проводились на биоманекенах, размещенных в кресле в правильной изготовочной позе для катапультирования. Показана достоверная прямая зависимость прироста давления в пульпозном ядре 12-го грудного межпозвонкового диска биоманекена от амплитуды ударной перегрузки «голова — таз».

Выявлены 2 временных диапазона, в которых отношения отклика системы «позвоночник» на ударное воздействие различаются. Длительность реакции позвоночника на ударную перегрузку «голова — таз» временем действия 10 — 30—35 мс превышает длительность возмущения, причем это различие убывает по мере возрастания длительности ударного воздействия. Во втором диапазоне, 35—40 — 160 мс, время реагирования позвоночника на ударную перегрузку «голова — таз» практически совпадает с длительностью возмущения, что, по-видимому, обусловлено частотой собственных колебаний грудопоясничного отдела позвоночного столба.

Ключевые слова: биомеханика, позвоночный столб, ударная перегрузка, межпозвонковый диск, противоударная защита членов экипажа.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 72–76.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-72-76

Катапультирование из самолетов и аварийные посадки летательных аппаратов по-прежнему сопровождаются травматизмом летного состава и пассажиров. К наиболее серьезным повреждениям у пострадавших относятся переломы позвоночника, вызванные ударной перегрузкой «голова — таз». Для профилактики таких повреждений необходимо детально представлять биомеханические особенности реакции тела человека на вертикальную динамическую нагрузку, в связи с чем актуальной остается задача изучения поведения позвоночного столба в условиях ударного нагружения.

Недостаток прямых экспериментальных данных, характеризующих поведение структур позвоночного столба на ударное воздействие, обусловил уделить особое внимание анализу таких особенностей реакции позвоночного столба, как изменение внутридискового давления и деформации тел позвонков под

влиянием ударной перегрузки «голова — таз» в диапазоне длительностей 10—160 мс. Данное сообщение сделано на основе анализа первичных данных, полученных нами в экспериментах, выполненных под руководством Г.П. Ступакова в середине 1980-х годов и частично описанных ранее [1].

Методика

Для экспериментов использовались трупы (биоманекены) мужчин, умерших в возрасте 20–50 лет от причин, которые не влияли на состояние опорно-двигательного аппарата. От момента смерти до испытаний проходило не более 48 ч. Накануне испытаний для исключения травм и патологических изменений позвоночного столба проводилась рентгенография биоманекенов в 2 проекциях.

Ударное воздействие создавалось с помощью вертикального копрового стенда, на платформе которого крепилось экспериментальное кресло, в котором с помощью 4-точечной привязной системы (по 2 плечевых и бедренных ремня) фиксировался биоманекен. Интенсивность ударного воздействия задавалась высотой подъема платформы стенда, длительность и форма импульса — характером амортизатора, на который сбрасывалась платформа.

Реакция позвоночника на ударное воздействие оценивалась по параметрам деформации передних отделов тел позвонков и межпозвонковых дисков, а также внутридискового давления. Сжатие передних отделов тел позвонков и межпозвонковых дисков регистрировалось наклеенными на них тензорезисторами КФ4П1-3-200В12. Для этого передняя брюшная стенка биоманекенов разрезалась по средней линии, внутренние органы смещались в сторону, передняя поверхность тел позвонков и межпозвонковых дисков очищалась от мягких тканей, обрабатывались эфиром и спиртом. Для наклеивания тензорезисторов на позвонки и межпозвонковые диски применялся клей МК-8 или СК-1 (разработаны лабораторией полимеров ВНИИ МТ). Деформация тензорезистора определяется по формуле

$$\Delta I = \Delta R \cdot I / R \cdot S$$

где ΔI — деформация тензорезистора, мм; ΔR — изменение сопротивления тензорезистора, Ом; I — база тензорезистора, мм; R — его сопротивление, Ом; S — коэффициент тензочувствительности.

Поскольку область измерения сжатия этим способом ограничена базой тензорезистора (3 мм), а размеры тел позвонков на различных анатомических уровнях позвоночного столба отличаются другот друга, то целесообразно ориентироваться не на абсолютную, а на относительную деформацию тензорезистора (ε), определяемую по формуле

$$\varepsilon = (\Delta I/I) \cdot 100\%$$

или

$$\varepsilon = (\Delta R / R) \cdot 100\%$$

В ряде экспериментов с помощью специально разработанной бароиглы, введенной в 12-й грудной межпозвонковый диск, регистрировалось изменение внутридискового давления по времени. В качестве чувствительного элемента бароиглы использовался тензорезистор КФ4П1-3-200В12.

Подробное описание блок-схемы измерительно-регистрирующих трактов и обоснование выбора измерительно-регистрирующей аппаратуры приведены в работе [1].

После ударного воздействия проводилось морфологическое обследование позвоночного столба биоманекенов.

Для изучения влияния ударной перегрузки «голова — таз» на внутридисковое давление анализировались результаты лишь тех экспериментов, в которых биоманекены были зафиксированы в кресле в правильной изготовочной позе для катапультирования, поскольку изменение позы само по себе сопровождается изменением реакции позвоночника на ударное воздействие [1]. С этой целью изучены данные, полученные в 20 опытах с 7 биоманекенами.

Исследование роли длительности ударного воздействия на особенности временной реакции позвоночного столба проведено на основе анализа 50 записей деформации тел 12-го грудного и 1-го поясничного позвонков 14 биоманекенов и 40 записей изменений давления внутри 12-го грудного межпозвоночного диска 7 биоманекенов.

Полученные результаты обрабатывались традиционными статистическими методами с использованием программы Microsoft Excel 2010.

Исследования проводились с соблюдением основных биоэтических правил.

Результаты и обсуждение

Для изучения влияния ударной перегрузки «голова — таз» на внутридисковое давление анализировались результаты лишь тех экспериментов, в которых биоманекены были зафиксированы штатной 4-точечной привязной системой (2 плечевых и 2 бедренных ремня) в кресле в правильной изготовочной позе для катапультирования, поскольку изменение позы само по себе сопровождается изменением реакции позвоночника на ударное воздействие [1].

Сопоставление величин прироста давления внутри 12-го грудного межпозвоночного диска и амплитуды ударной перегрузки показало их прямую достоверную связь (r=0,512; уровень значимости a<0,05) (рис. 1), что в принципе совпадает с тенденциями, отмеченными А. Nachemson для условий статического нагружения сегментов поясничного отдела позвоночника [2].

Обращает на себя внимание большой разброс экспериментальных данных. По-видимому, это связано со значительной индивидуальной вариабельностью величин, присущих внутридисковому давлению. Это косвенно подтверждается проведенным нами статистическим анализом первичных данных, полученных А. Nachemson в ходе прямых измерений давления в поясничных дисках добровольцев в позе сидя [2]. Установлено, что величины давления колебались в пределах от 4,9 до 15,3 кГ/см², причем эта вариабельность хорошо описывалась законом нормального распределения (а < 1%), средняя величина составила 10,71 кГ/см² (1049,6 кПа), среднее квадратическое отклонение 2,35 кГ/см² (230,3 кПа), коэффициент вариации 21,9 %.

Прирост величины внутридискового давления, формирующегося при действии ударных перегрузок травмоопасного уровня (амплитуда 16 ед., длительность 120–140 мс), в соответствии с уравнением на

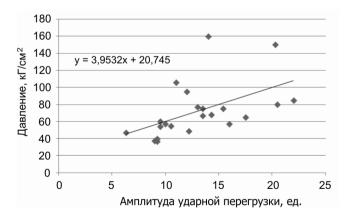


Рис. 1. Зависимость прироста давления в 12-м грудном межпозвоночном диске от амплитуды ударной перегрузки на кресле

рис. 1 достигают 84 кГ/см², или 8231,6 кПа. С учетом средних значений, характерных для человека, находящегося в позе сидя (1049,6 кПа), суммарная величина внутридискового давления может составить 9281,2 кПа.

Средняя масса тела биоманекенов, у которых регистрировалась динамика внутридискового давления, составила 67,5 кг. Так как на уровень 1-го поясничного позвонка действует 50 % массы тела человека [3], то при вертикальной перегрузке амплитудой 16 ед. на этот уровень будет действовать сила, равная 5293 Н. Оценим давление, которое в целом передается на область 1-го поясничного позвонка. В наших исследованиях площадь верхней замыкательной пластинки не изучалась, однако измерялась площадь верхней замыкательной пластинки 12 грудных позвонков, которая в среднем составила 13,2 см². Соотношение площадей 12-го грудного и 1-го поясничного позвонков составляет 1:1,1. Исходя из этого, средняя расчетная площадь 1-го поясничного позвонка будет 14,5 см². В этом случае искомое давление будет равно 365 H/cm², или 3650 кПа. Эта величина существенно, в 2,5 раза ниже, чем давление внутри ядра 12-го грудного диска (9281,2 кПа). Таким образом, преимущественному нагружению подвергаются области проекции пульпозного ядра, что косвенно подтверждает особенности реагирования позвоночника на осевую нагрузку: преимущественной нагрузке и соответственно деформации подвергаются центральные отделы замыкательной пластинки по сравнению с периферическими, о чем сообщалось ранее [4].

Полезная информация получена при сопоставлении временных характеристик реагирования позвоночника с временем действия возмущения. Рассматривались отношения длительностей изменения деформации тел 12-го грудного и 1-го поясничного позвонков биоманекенов, $t_{\rm n}$, к длительности ударной перегрузки «голова — таз», $t_{\rm yn}$ ($K_1 = t_{\rm n}/t_{\rm yn}$) и длительностей изменения внутридискового давления 12-го грудного межпозвоночного диска биоманекенов, $t_{\rm n}$, к длительности ударной перегрузки «голова-таз», $t_{\rm yn}$ ($K_2 = t_{\rm n}/t_{\rm yn}$).

Из рис. 2 видно, что логарифмы показателей K_1 (рис. 2, A) и K_2 (рис. 2, Б) по-разному ведут себя в различных диапазонах длительностей перегрузки. В первом диапазоне, менее 30–35 мс, наблюдается отрицательная связь логарифмов этих показателей со временем действия перегрузки. Для K_1 эта связь достоверна (K_2 отмечается лишь выраженная тенденция (K_2 отмечается лишь (

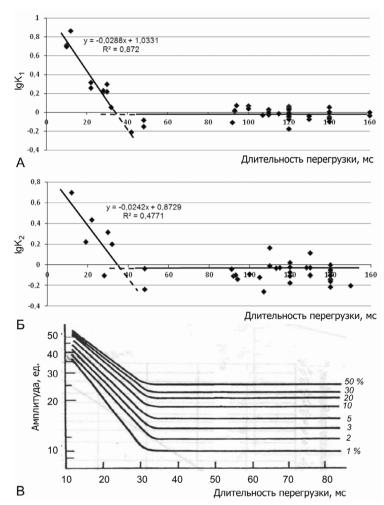


Рис. 2. Зависимость биомеханических характеристик позвоночника от длительности ударной перегрузки. Объяснения в тексте

длительность возмущения, причем это различие убывает по мере возрастания длительности ударного воздействия. Во втором диапазоне, от 35–40 мс до 160 мс сколько-нибудь значимой корреляционной связи логарифмов показателей K_1 и K_2 со временем действия перегрузки не обнаружено: коэффициенты корреляции составили соответственно r=-0,02 и r=0,03, медианы $lg\ K_1=0\ (\text{т.e.}\ K_1=1)$, $lg\ K_2=-0,081\ (\text{т.e.}\ K_2=0,83)$. Иными словами, в диапазоне от 35–40 мс до 160 мс время реагирования позвонков и межпозвонковых дисков на ударную перегрузку практически совпадает с длительностью возмущения.

Обращает на себя внимание сходство описанных нами зависимостей с кривыми равного эффекта (см. рис. 2, В) воздействия ударной перегрузки «голова – таз» на позвоночник человека, приведенными Г.П. Ступаковым и др. [5]. Семейство кривых на рис. 2, В отражает вероятность травмирования тел позвонков (в %) при соответствующем ударном воздействии. Отмеченное сходство закономерно, поскольку отражает биомеханические характеристики

тела человека как вязко-упругого образования, которые впервые были описаны М. Kornchauser [6], P. Payne [7], H. von Gierke [8].

Граница отмеченных диапазонов длительностей (30-35 мс) соответствует полупериоду собственных колебаний грудопоясничного перехода позвоночного столба, что практически совпадает с данными Г.П. Ступакова и соавт. [1, 5], полученными в результате математического моделирования реакции тела человека на ударную перегрузку «голова таз». Таким образом, можно утверждать, что приведенные экспериментальные данные подтверждают результаты математического моделирования, и предложенный Г.П. Ступаковым подход к регламентированию ударных воздействий (в первом диапазоне длительностей ударной перегрузки «голова таз», меньше 33 мс, при оценке биологического эффекта следует ориентироваться на импульс ускорения, а во втором, больше 33 мс, на амплитуду и скорость нарастания перегрузки) опирается на надежные экспериментальные основы.

Определенный практический и теоретический интерес представляют данные о локализации переломов тел позвонков биоманекенов, которые были получены в наших экспериментах. Ударные воздействия привели к переломам 11 тел позвонков у 5 биоманекенов. Ранее, на основе собственных результатов (диапазон длительностей ударной перегрузки 10-87 мс) и анализа литературных данных (диапазон длительностей ударной перегрузки 160-260 мс) Г.П. Ступаковым и соавт. [1] была построена зависимость анатомического уровня переломов позвоночника от соответствующего времени действия перегрузки «голова – таз». Как видно из рис. 3, наши результаты, приведенные в области, ограниченной овалом, хорошо укладываются в тенденцию, описанную ранее Г.П. Ступаковым и соавт. [1], и заполняют тот промежуток, в отношении которого данных не было. Применительно к нашим результатам отмечена достоверная (уровень значимости a = 5 %), довольно сильная корреляционная связь (r = 0,802) уровня повреждения с длительностью ударного воздействия. По нашему мнению, они хорошо косвенно подтверждают вывод о связи анатомического уровня локализации перелома с параметрами перегрузки, прежде всего с ее длительностью. По мнению, Г.П. Ступакова такая связь объясняется соотношением длительности ударного воздействия и периода собственных колебаний позвоночного столба, убывающего от верхних к нижним отделам. Безусловно, на локализацию травм большое влияние оказывают и другие факторы, прежде всего поза человека в момент удара. Именно поэтому отмечается такой широкий разброс экспериментальных данных на рис. 3, однако собственные частоты колебаний различных отделов позвоночника играют заметную роль.

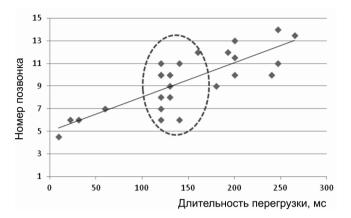


Рис. 3. Локализация повреждений позвонков в зависимости от длительности ударной перегрузки.

По оси ординат – номер позвонка: 1-12 – соответственно 1-12-й грудные; 13 и 14-1-й и 2-й поясничные позвонки

Выводы

- 1. Экспериментально показана достоверная прямая зависимость прироста давления в пульпозном ядре 12-го грудного межпозвонкового диска биоманекена, размещенного в кресле в правильной изготовочной позе для катапультирования, от амплитуды ударной перегрузки «голова-таз», зарегистрированной на кресле.
- 2. Экспериментально выявлены 2 временных диапазона, в которых отношение отклика системы «позвоночник» на ударное воздействие различаются. Длительность реакции позвоночника на ударную перегрузку «голова таз» временем действия 10 30—35 мс превышает длительность возмущения, причем это различие убывает по мере возрастания длительности ударного воздействия. Во втором диапазоне, 35—40 160 мс, время реагирования позвоночника на ударную перегрузку «голова таз» практически совпадает с длительностью возмущения, что, по-видимому, обусловлено частотой собственных колебаний грудопоясничного отдела позвоночного столба.
- 3. Получены данные, уточняющие связь анатомического уровня переломов позвоночника от соответствующего времени действия перегрузки «голова таз».

Список литературы

1. Ступаков Г.П., Козловский А.П., Казейкин В.С. Биомеханика позвоночника при ударных перегрузках в практике авиационных и космических полетов. Л., 1987.

Stupakov G.P., Kozlovsky A.P., Kazeykin V.S. Biomechanics of the spine during impact acceleration in practice of aerospace flights. Leningrad, 1987.

2. *Nachemson A*. Lumbar intradiscal pressure // Acta Orthop. Scand. Suppl. 43. 1960.

- 3. *Ruff S*. Brief acceleration: less than one second // German Aviation Medicine in World War II. Washington, 1950. V. 1. P. 584–596.
- 4. *Моисеев Ю.Б.* Изучение механизмов реагирования позвоночника человека на статические и динамические продольные механические нагрузки // Авиакосм. и экол. мед. 2014. Т. 48. \mathbb{N}° 5. С. 46–50.

Moiseev Yu.B. Mechanisms of changes in the human spinal column in response to static and dynamic axial mechanical loading // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2014. V. 48. N_{2} 5. P. 46–50.

5. *Ступаков Г.П., Гозулов С.А., Казейкин В.С.* Ударные перегрузки. // Человек в космическом полете. М., 1997. Т. III. Кн. 2. Гл. 14. С. 68–98.

Stupakov G.P., Gozulov S.A., Kazeykin V.S. Impact accelerations // Man in space flight. Moscow, 1997. V. III. Book 2. P. 68–98.

- 6. Kornchauser M. Theoretical prediction of the effect of rate of onset on man's g-tolerance // Aerospace Med. 1961. V. 32. \mathbb{N}° 5. P. 412–421.
- 7. Payne P.R. The dynamics of human restraint system // Impact acceleration stress: A symposium held at Brooks Air Force Base (Nov. 27–29, 1961). Washington, 1962. P. 195–257.
- 8. *Gierke von H.E.* Response of the body to mechanical forces: An overview // Lectures in Aerospace Medicine. Sixth series. Houston (TX), 1967. P. 325–344.

Поступила 06.08.2019

SOME FEATURES OF THE HUMAN SPINAL COLUMN REACTION TO APPLIED IMPACT

Moiseev Yu.B.

Scientific Research Testing Centre Aerospace Medicine and Military Ergonomic of Central Scientific Research Institute of Air force, Ministry Defense, Russian Federation, Moscow

The experiments were performed with dummies molded for ejection seat tests. A reliable direct dependence of pressure rise in nucleus pulposus of thoracic intervertebral disk-12 on amplitude of the head-to-pelvis impact load was stated.

There were two time spans where impact responses of the thoracic spine were different. The spinal reaction to impact within the time span from 10 to 30–35 ms exceeded the disturbance duration; however, this difference diminished as the impact time extended. Within the time span from 35–40 to 160 ms the spinal reaction time actually concurred with disturbance duration which can be explained by oscillation frequency inherent of the spinal column.

Key words: biomechanics, spinal column, impact load, intervertebral disk, impact safety.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 72–76.

УДК 613.693

ОСОБЕННОСТИ АНТРОПОМОРФНОГО MAHEKEHA ТИПА HYBRID-III ПРИ ОЦЕНКЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОЛОВУ

Шибанов В.Ю.¹, Моисеев Ю.Б.², Наумов В.А.¹, Рыженков С.П.²

¹Научно-производственное предприятие «Звезда» им. акад. Г.И. Северина, пос. Томилино, Московская область ²Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института ВВС Минобороны России, Москва

E-mail: ybmn@rambler.ru

В статье рассмотрены особенности учета результатов испытаний средств противоударной защиты головы членов экипажа транспортных средств. Объектом исследования была голова антропоморфного манекена типа Hybrid-III как испытательное и измерительное средство. Изучены реакции головы манекена на удар со скоростями 2,5; 3; 3,5 и 4 м/с в лобную, затылочную и височную области. Удар моделировался сбросом головы на жесткую поверхность со скоростями 2,5; 3; 3,5 и 4 м/с. Скорость соударения рассчитывалась по данным скоростной киносъемки. Регистрировались составляющие перегрузки горизонтального, вертикального и бокового направлений (в координатах головы манекена) с расположением датчиков в голове манекена. Рассчитывались величины импульса скорости и критерия травмирования головы – HIC (Head Injury Criteria). Показано, что при одной и той же силе соударения удар в продольном направлении (лоб – затылок и затылок – лоб) вызывает более выраженную реакцию, чем удар в поперечном направлении (висок – висок). Для адекватной оценки результатов испытаний проведено их сопоставление с особенностями устойчивости человека к повреждениям, в качестве которых использовались данные литературы изучения реальных исходов травм головы. Одинаковому биологическому эффекту (степени повреждения головы) соответствуют следующие соотношения показателей, зарегистрированных в ходе испытаний (или рассчитанных по результатам испытаний) при ударе соответственно в лобную, затылочную и височную области: для импульса 1,43:1,33:1 м/с; для перегрузки 1,62:1,62: 1 ед.; для показателя повреждения головы – HIC 2,09:2,17:1 ед. Знание выявленных особенностей в сочетании с данными научной литературы о травмоопасности для человека соударения разными отделами головы позволят более точно интерпретировать результаты испытаний средств противоударной защиты. Кроме того, полученные в работе результаты могут послужить основой для выработки критериев оценки травмобезопасности при ударах головой в ходе экспериментов с антропоморфным манекеном типа Hybrid.

Ключевые слова: антропоморфный манекен, испытания, противоударная защита, травмы головы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 77–83.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-77-83

Эксплуатация транспортных средств (автомобили, мотоциклы, самолеты, вертолеты и т.д.) неизбежно сопровождается авариями и катастрофами. в которых травмируются люди. Закономерно, что обеспечение травмобезопасности водителя (экипажа) и пассажиров транспортных средств в ходе транспортного происшествия является одной из важных задач. Оценка травмобезопасности проводится в процессе натурных или полунатурных испытаний, в которых из-за большой опасности вместо людей применяют физические аналоги тела человека – антропоморфные измерительные манекены. Широкое распространение получили антропоморфные манекены (AM) семейства Hybrid, удовлетворительно моделирующие многие кинематические и динамические реакции тела человека на ударное воздействие, сопровождающее аварию с транспортным средством.

Одной из наиболее часто повреждаемых областей тела в транспортных происшествиях является голова. Такие травмы, как правило, обусловлены ее чрезмерным инерционным смещением и соударением с окружающими предметами, прежде всего с элементами интерьера. Иными словами, в основе подобных повреждений головы лежит контактный удар, вызывающий деформации структур черепа и головного мозга, поэтому важную роль в оценке травмобезопасности человека в ходе транспортного происшествия играет изучение реакции на удар головой.

В настоящее время предложено достаточно много методик оценки травмоопасности черепно-мозговой травмы, однако в основе большинства из них лежит так называемая кривая Патрика, или кривая Уэйн-Стейта, связывающая вероятность повреждения с величинами перегрузки и длительностью ударного воздействия. Соотнесение зарегистрированных в голове характеристик ударной перегрузки с нормативной кривой лежит в основе первого методического подхода такой оценки.

Второй подход, получивший наибольшее распространение среди официальных способов аттестации

средств защиты [1–3], базируется на расчете так называемого показателя повреждения головы – HIC (Head Injury Criteria), который проводится на основе учета характеристик изменения перегрузок в голове по времени. Полученная в результате расчета величина сравнивается с нормативной [1–3].

Третий подход связан с оценкой импульса ударного воздействия (модифицированным методом оценки по кривой Патрика) и скорости изменения зарегистрированной в голове манекена в процессе удара перегрузки [5].

Обсуждение достоинств и недостатков каждого из подходов, а также обоснованности количественных критериев травмобезопасности не является задачей данной работы. Для реализации всех этих подходов необходимы экспериментальные данные, зарегистрированные в ходе реальных испытаний. Эти данные в настоящее время получаются, как правило, с помощью АМ Hybrid-II или Hybrid-III. Вместе с тем разработка конструкции АМ и критериев травмобезопасности головы проходили параллельно, практически независимо друг от друга.

Голова человека представляет собой сложноорганизованную биомеханическую систему, состоящую из тканей различной плотности и жесткости (кости, головной мозг, погруженный в несжимаемую спинномозговую жидкость, соединительнотканные оболочки головного мозга и т.д.), образующих сложную пространственную фигуру с полостями и стенками различной толщины. В связи с этим удар в область головы вызывает сложную гамму деформаций и напряжений в элементах этой системы, причем реакции на удар характеризуются выраженной анизотропией, т.е. зависят от места приложения контактной силы. В результате травмоопасность ударов в лобную, затылочную и височную области различна, что было подтверждено на основе анализа исходов черепно-мозговых травм [4]. С другой стороны, конструкция головы AM типа Hybrid с механической точки зрения несравненно проще биомеханической структуры головы человека и, следовательно, механические реакции на удар у АМ будут отличаться от биомеханического ответа головы. Кроме того, характеристики ударной перегрузки зависят не только от механических свойств головы АМ, но и от места и способа крепления регистрирующей аппаратуры. Это значит, что использование нормативов травмобезопасности без адаптации к свойствам измерительного устройства (в нашем случае – АМ типа Hybrid) не совсем правильно. В связи с этим сформулирована цель нашей работы – изучить некоторые особенности головы AM Hybrid-III как измерительного устройства применительно к оценке травмобезопасности соударения головы человека с препятствием.

Методика

Объектом испытаний являлся механический имитатор головы человека — головной отдел 50-перцентильного AM Hybrid-III 50^{th} Male (Гибрид 3), оснащенный датчиками перегрузки.

Для проведения испытаний был разработан специальный стенд для сброса головы манекена на жесткую плиту с регулировкой высоты начального положения и направления действия ударного воздействия.

В процессе проведения испытаний регистрировались составляющие перегрузки горизонтального (n_x) , вертикального (n_y) и бокового (n_z) направлений (в координатах головы АМ) с расположением датчиков в голове манекена с диапазоном измерения \pm 1000 ед. и частотой регистрации по каналу 20 000 Гц. Скорость сброса головы АМ определялась по раскадровке скоростной видеокамеры. Средства измерений, использованные в работе, указаны в табл. 1.

Все испытания проводились в копровом зале ОАО НПП «Звезда» с использованием специального стенда для сбросов.

Испытания состояли из 2 этапов.

Первый этап включал 4 сброса. На 1-м этапе было последовательно осуществлены 4 технологических сброса, направленных на обеспечение точности измерений перегрузок и точности места приложения ударной нагрузки. В ходе 1-го этапа испытаний проведена отработка функционирования системы измерений. Для этого на основе рекомендованной производителем манекена методики осуществлен сброс головы АМ Hybrid-III с установленными датчиками с высоты 376 ± 1 мм и последующим ударом лбом о металлическую плиту толщиной более 50 мм. При этом измеренное пиковое значение зарегистрированной суммарной перегрузки находилось вблизи верхней границы определенного в методике настройки АМ диапазона (230—285 ед.).

На 2-м этапе испытаний проводились сбросы головы манекена лобной, затылочной и височной областями со скоростями соударения 2,5; 3,0; 3,5 и 4,0 м/с. Все испытания проводились при температуре $21,4~(\pm1)$ °C.

В каждом сбросе измерялись и регистрировались:

- а) скорость головы в момент соударения с плитой V_{o} ;
- б) перегрузки по времени по каждой из 3 взаимно перпендикулярных осей головы — $n_x(t)$, $n_y(t)$ и n(t).

Для проведения дальнейшего анализа определенные в каждом из сбросов компоненты перегрузок были отфильтрованы с использованием программного фильтра, обеспечивающего класс частоты, равной 1000. Для этого использовался фильтр Баттерворда 8-го порядка с частотой среза 1650 Гц.

Средства измерения при проведении экспериментов

Nō	Наименование	Примечание
1	Акселерометр Брюль и Кьер типа 4393	Измерение составляющих перегрузки в голове ${\rm n_{_{x}}},{\rm n_{_{y}}}$ и ${\rm n_{_{z}}}$
2	Согласующий усилитель Брюль и Кьер типа 2635	Нормирование выходных сигналов акселерометров
3	Преобразователь напряжения Е-14-440	Регистрация аналоговых сигналов на персональный компьютер с частотой дискретизации 20 кГц по каналу
4	Линейка металлическая L= 1000 мм (ГОСТ 427-75)	Измерение высоты сброса головы
5	Скоростная цифровая видеокамера Casio ex-f1 с прогрессивной разверткой, частота съемки 300 к/с	Фиксация процессов сбросов с определением вертикальной скорости головы в момент подхода к металлическому основанию

После этого по 3 компонентам определялась суммарная перегрузка $n_{\rm s}(t)$ – как модуль геометрической суммы перегрузок вдоль каждой из 3 осей:

$$n_{\Sigma}(t) = \sqrt{n_x^2(t) + n_y^2(t) + n_z^2(t)}$$
, (1)

Далее по определенным по формуле (1) значениям суммарных перегрузок были определены параметры реакции головы АМ Hybrid-III, после чего было проведено их сопоставление с величинами скоростей соударения $V_{\rm o}$.

Следует отметить, что полученные параметры реакции головы на удар являются общепринятыми и используются при исследованиях ударного воздействия на человека при авариях различных объектов. К этим параметрам относятся:

- а) величина $n_{_{\Sigma \max}}$ максимальное значение суммарной перегрузки $n_{_{\Sigma}}(t)$, определяемой в соответствии с формулой (1);
- б) импульс ударного ускорения, определяемого согласно формуле (2):

$$\Delta V_{\Sigma} = g \int_{t_0}^{t_k} n_{\Sigma}(t) dt , \qquad (2)$$

где t_0 , t_k — время начала и окончания действия ударной перегрузки $n_s(t)$.

в) величина критерия HIC, определяемого в соответствии с формулой (3):

$$HIC = \{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_1} n_{\Sigma}(t) dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \}_{\text{max}}, \quad (3)$$

где $n_{\scriptscriptstyle \Sigma}$ – величина суммарной перегрузки, зарегистрированной в голове; $t_{\scriptscriptstyle 2}$ – $t_{\scriptscriptstyle 1}$ – переменная продолжительность действия основного удара головы, но не более 0,05 с.

Результаты и обсуждение

Обобщенные результаты испытаний в графическом виде приведены на рис. 1–3.

Как видно из рис. 1, величина импульса удара была связана нелинейной положительной связью со скоростью соударения, причем характер этой связи сходен с условиями удара, приходящегося на различные области головы. При ударе затылочной и лобной зонами количественные ее характеристики отличались мало, в то время как соударение височной областью приводило к меньшему приросту импульса по сравнению с другими зонами.

Величина перегрузки, зарегистрированная в голове АМ, нелинейно зависит от скорости соударения с препятствием (см. рис. 2). Наибольшее нарастание величина перегрузки имело место при ударе затылочной областью. Реакции на удар лобной и височной областями отличались мало.

Величина НІС нелинейно положительно связана с величиной скорости соударения (см. рис. 3). Количественные характеристики этой связи зависят от локализации удара: наиболее резко НІС нарастает при ударе затылочной области головы АМ, самый медленный прирост — при ударе височной зоной.

Как видно из рис. 1–3, при одной и той же силе соударения удар в продольном направлении (лоб-затылок и затылок – лоб) вызывает более выраженную реакцию, чем удар в поперечном направлении (висок – висок), что характеризует особенности головы АМ как моделирующего и регистрирующего устройства, обусловленные его механическими характеристиками, местом и способом крепления датчиков. Эти особенности должны обязательно учитываться при интерпретации результатов испытаний.

Однако помимо знания особенностей реагирования головы АМ на удар для адекватной оценки результатов испытаний необходимо соотнести их с особенностями устойчивости человека к

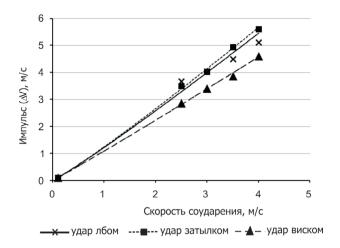


Рис. 1. Зависимость импульса (ΔV) от скорости соударения головы с препятствием

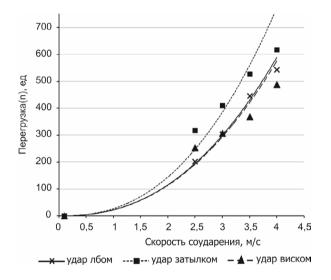


Рис. 2. Зависимость величины перегрузки (n) от скорости соударения головы с препятствием

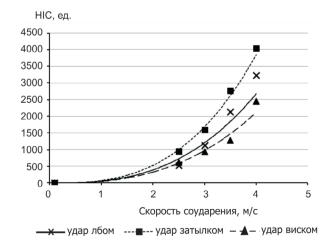


Рис. 3. Зависимость величины HIC от скорости соударения головы с препятствием

повреждениям. Для этого воспользуемся данными изучения реальных исходов травм головы.

На основе анализа исходов черепно-мозговых травм, проведенных по архивным данным НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, была установлена зависимость между тяжестью травмы головы и скоростью соударения с преградой [4]:

$$K^{2.5} = a_i + b \lg V^2,$$
 (4)

где K — степень тяжести травмы; a_i и b — коэффициенты; V — скорости соударения с преградой.

При этом величины коэффициента a_i зависят от локализации удара (для лобной области a=-21,33; области затылка a=-17,62; области виска a=-13,85), т.е. при одинаковой скорости соударения наиболее тяжелые повреждения получаются при ударе в висок, а наименее тяжелые — в лоб. Величина коэффициента b не зависит от локализации удара (она составляет 43,9), что, по мнению авторов [4], свидетельствует о единстве пусковых механизмов травм головы различной локализации.

Степень тяжести травмы K имеет 6 градаций:

- категория 1: сознание не нарушено, легкие общемозговые и стволовые симптомы, отсутствуют признаки очагового поражения других отделов мозга;
- категория 2: легкое нарушение сознания (оглушенность, амнезия), четкие стволовые симптомы, возможны очаговые симптомы поражения других отделов головного мозга, в течение следующих 3 нед возможны изменения;
- категория 3: в ближайшем последствии состояние то же, но вероятность ухудшения его состояния до коматозного;
- категория 4: утрата сознания менее 1 ч, значительные общемозговые и стволовые симптомы, ухудшение состояния до коматозного, без витальных нарушений;
- категория 5: раннее развитие коматозного состояния с нарушением витальных функций;
- категория 6: смертельный исход в течение 1 сут.

Наибольшее практическое значение при оценке травмобезопасности соударения головы человека с препятствием имеют категории 1—4, поскольку потенциально смертельные и смертельные уровни повреждения не могут быть признаны приемлемыми. В связи этим с помощью уравнения (4) определили скорости соударения разными частями головы, которые приводят к одинаковой степени повреждения. Результаты расчета представлены в табл. 2.

С использованием закономерностей, приведенных на рис. 1—3, и данных табл. 2 была проведена оценка показателей реакции головы АМ, соответствующих разным степеням повреждения при ударах различными областями головы. Результаты этой оценки приведены в табл. 3.

Таблица 2

Скорости соударения (м/с) различных областей головы с препятствием, вызывающие разные степени повреждения

Стополи поврождения	Область головы				
Степень повреждения	лобная	затылочная	височная		
1	1,75	1,59	1,44		
2	2,04	1,84	1,66		
3	2,63	2,40	2,16		
4	4,05	3,67	3,33		

Таблица 3

Показатели реакции головы AM, соответствующие разным степеням повреждения при ударах различными областями головы

	Степень повреждения						
Область головы	1	2	3	4			
		Импульс, м/с					
Лобная	2,23	2,63	3,47	5,53			
Затылочная	2,07	2,42	3,24	5,16			
Височная	1,59	1,84	2,42	3,78			
	Перегрузка, ед.						
Лобная	84,3	120,9	219,7	606,4			
Затылочная	83,0	118,2	224,6	626,9			
Височная	52,8	73,7	136,3	375,0			
	НІС, ед.						
Лобная	269,8	412,8	835,2	2766,4			
Затылочная	273,6	415,7	889,9	3003,9			
Височная	134,0	196,7	400,6	1289,8			

Таблица 4

Соотношения показателей реакции головы АМ, соответствующих разным степеням повреждения при ударах различными областями головы

	Степень повреждения					G1 01		
Область головы	1	2	3	4	X ± σ	CV, %		
	Импульс							
Лобная	1,40	1,43	1,43	1,46	1,43 ± 0,03	2,1		
Затылочная	1,30	1,32	1,34	1,37	1,33 ± 0,03	2,2		
Височная	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
	Перегрузка							
Лобная	1,60	1,64	1,61	1,62	1,62 ± 0,02	1,2		
Затылочная	1,57	1,60	1,65	1,67	1,62 ± 0,05	2,8		
Височная	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
	HIC							
Лобная	2,01	2,10	2,09	2,15	2,09 ± 0,06	2,8		
Затылочная	2,04	2,11	2,22	2,32	2,17 ± 012	5,7		
Височная	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			

Примечание. X – среднее значение; σ – среднее квадратическое отклонение, CV – коэффициент вариации.

Для практического применения необходимо соотношения характеристик реакции головы АМ на удары разной локализации, представленных в табл. 3 и выраженных в абсолютных значениях, привести в относительные показатели, которые можно использовать в широком диапазоне условий испытаний. Соответствующие относительные соотношения представлены в табл. 4. Сопоставлялись реакции, вызывающие одну и ту же степень повреждения и определяемые в голове АМ при ударе в лобную, затылочную и височную области. Применительно к каждой категории реакции (величина импульса, перегрузки или HIC) в качестве знаменателя рассматривалась реакция, зарегистрированная при ударе в височную область. Ее величина принималась равной единице.

Хотя соотношения реакции на удар в область лба, затылка и виска АМ несколько отличаются в зависимости от степени повреждения, эти различия относительно невелики (см. табл. 4).

Таким образом, одинаковому биологическому эффекту (степени повреждения головы) соответствуют следующие соотношения показателей, зарегистрированных в ходе испытаний (или рассчитанных по результатам испытаний), при ударе соответственно в лобную, затылочную и височную области:

- для импульса 1,43:1,33:1,0;
- для перегрузки 1,62:1,62:1,0;
- для HIC 2,09:2,17:1,0.

Эти данные позволяют учесть особенности реагирования при ударе головой как человека, так и АМ Hybrid в качестве измерительного устройства и дать более точную и надежную оценку травмобезопасности при транспортной аварии.

Проиллюстрируем полученные выводы примерами. Предположим, в испытаниях при ударе лобной областью о препятствие в голове АМ определена реакция, равная 1000 ед. НІС. Такой удар вызовет у человека травму определенной тяжести. Для того чтобы человек получил такое же по тяжести повреждение, но при ударе височной областью, необходимо, чтобы этот удар вызвал в голове АМ реакцию в 2,09 меньшую, т.е. 479 ед. НІС.

При ударе затылком в голове АМ зарегистрирована перегрузка, равная 800 ед. Чтобы привести к повреждению головы человека такой же степени тяжести при соударении с препятствием височной областью, удар должен вызывать в голове АМ перегрузку, которая будет меньше в 1,62 раза, или 494 ед.

Во время удара височной областью в голове АМ определен импульс равный 4 м/с. Чтобы вызвать такую же степень повреждения головы у человека при ударе лбом, импульс в голове должен быть в 1,33 раза больше, т.е. 5,32 м/с.

Выводы

- 1. Определены особенности реагирования головы AM Hybrid в качестве измерительного устройства, которые заключаются в анизотропной реакции на удар: при одной и той же силе соударения с препятствием удар в продольном направлении (лоб затылок и затылок лоб) вызывает более выраженную реакцию, чем удар в поперечном направлении (висок висок).
- 2. Знание этих особенностей в сочетании с данными научной литературы о травмоопасности для человека соударения разными отделами головы позволили выявить количественные соотношения характеристик реакции головы AM Hybrid на удар (величины импульса, перегрузки, показателя HIC), вызывающих одинаковую степень повреждения головы.
- 3. Полученные результаты могут послужить основой для выработки критериев оценки травмобезопасности при ударах головой в ходе экспериментов с AM типа Hybrid.

Список литературы

1. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. 2009.

Aviation rules. Part 25. Airworthiness standards for aircraft of a transport category. 2009.

2. Авиационные правила. Часть 27. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов. М., 2002.

Aviation rules. Part 27. Airworthiness standards for rotarywing vehicles. Moscow, 2002.

3. Авиационные правила. Часть 29. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. М., 2003.

Aviation rules. Part 29. Airworthiness standards of rotarywing vehicles of the transport category. Moscow, 2003.

4. Проблемы прочности в биомеханике: Учеб. пос. / И.Ф. Образцов, ред. М., 1988.

Strength problems in biomechanics: Proc. Manual / I.F. Obraztsov, ed. Moscow, 1988.

5. *Рабинович Б.А*. Безопасность космонавта при посадочном ударе спускаемого аппарата на грунт. М., 2014.

Rabinovich B.A. The cosmonaut's safety during the landing strike of the descent vehicle to the ground. Moscow, 2014.

Поступила 18.04.2019

USE OF THE HYBRID-III ANTHROPOMORPHIC PHANTOM IN TESTING THE IMPACT ACTION ON THE HEAD

Shibanov V.Yu.¹, Moiseev Yu.B.², Naumov V.A.¹, Ryzhenkov S.P.²

¹Scientific-production enterprise «Zvezda», Russian Federation, pos. Tomilino, Moscow region ²Scientific Research Testing Centre Aerospace Medicine and Military Ergonomic of Central Scientific Research Institute of Air force, Ministry Defense, Russian Federation, Moscow

The paper dwells on the protocol of testing headguards for drivers. The head of phantom Hybrid-III was both the test object and instrument. The purpose was to study damage to the front, occipital and temporal regions due to strokes at 2.5; 3.0; 3.5 and 4.0 m/s. The stroke was modeled by throwing the head on a rigid surface. The impact velocity was calculated from the speed video data. Horizontal, vertical and lateral accelerations (in the head coordinates) were measured by in-built sensors. Values of the impulse

of velocity and head injury criteria (HIC) were calculated. It was stated that one and the same longitudinal impact force (front-to-occiput and occiput-to-front) produces a stronger reaction than the latitudinal stroke (temple-to-temple). To evaluate the results adequately, we compared them to the literary data about resistance to and outcome of human head injuries. An equal biological effect (damage severity) is caused by strokes with the measured velocity impulse of 1.43, 1.33 and 1.0 m/s in the frontal, occiputal and temple regions, respectively, and acceleration values of 1.62, 1.62 and 1.0 units in the frontal, occiputal and temple regions, respectively. HIC is equal to 2.09, 2.17 and 1.0 units, respectively. Our findings coupled with the literary evidence of the danger of impact trauma to different regions of the head enable a more accurate interpretation of the results of testing headquards. In addition, these findings may serve the purpose of setting the criteria of trauma risk estimation in testing headquards.

Key words: anthropomorphic phantom, tests, anti-impact head protection, head injury.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 77–83.

УДК 611.08:615.21:599.3/.8

ДЕЙСТВИЕ КОМБИНАЦИЙ МЕЛАТОНИНА С ПРОИЗВОДНЫМИ 3-ГИДРОКСИПИРИДИНА НА НЕЙРОНЫ ТЕМЕННОЙ АССОЦИАТИВНОЙ КОРЫ БОЛЬШОГО МОЗГА У ЖИВОТНЫХ

Яснецов Вик.В., Иванов Ю.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 кошках установлено, что новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119, лекарственные препараты мелатонин и мексидол, а также комбинации мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом оказывали прямое влияние на 84,4; 54,3; 68,8; 75,8; 98; 87 и 89,4 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры, при этом угнетающий эффект у ИБХФ-27 наблюдался в 1,7 и 1,4 раза чаще, чем у СК-119 и мексидола. У комбинаций мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом угнетающий эффект на нейроны отмечался чаще, чем у их компонентов в отдельности, а прямое влияние у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 – чаще, чем у ее компонентов. Более того, у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 угнетающий эффект наблюдался чаще, чем у 2 других комбинаций – мелатонина с СК-119 и мексидолом, а прямое влияние на нейроны – чаще, чем у комбинации мелатонина с СК-119. Следовательно, поле 5 теменной ассоциативной коры играет важную роль в реализации центрального действия указанных комбинаций веществ.

Ключевые слова: новые производные 3-гидроксипиридина, мелатонин, мексидол, комбинация, поле 5 теменной ассоциативной коры, кошки.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 84–88.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-84-88

В современном мире болезнью движения (БД), или укачиванием, развивающейся как при различных способах передвижения в пространстве (активных или пассивных), так и при оптокинетических раздражениях страдает огромное количество людей [1, 2]. Это обусловлено интенсивным развитием мореплавания и авиации, освоением космического пространства, а также появлением новых видов наземного транспорта и др. [3, 4]. Также следует особо подчеркнуть, что космическая форма БД непредвиденно возникает у практически здоровых людей разных этнических групп, готовых к ней [5]. Поэтому БД – одна из важнейших проблем авиакосмической и морской медицины, для путешественников, а изыскание новых эффективных средств ее профилактики и лечения является своевременным и актуальным.

В настоящее время установлено, что мелатонин (основной гормон шишковидной железы) обладает уникальным спектром биологической активности, в частности, оказывает антиоксидантное, адаптогенное, гепатопротекторное, противовоспалительное, нейропротекторное и снотворное действие, тормозит секрецию гонадотропинов, нормализует циркадные ритмы, регулирует цикл «сон – бодрствование», суточные изменения локомоторной активности и температуры тела, положительно влияет на интеллектуально-мнестические функции мозга, эмоционально-личностную сферу, снижает стрессовые реакции, регулирует нейроэндокринные функции, проявляет иммуностимулирующие свойства, эффективен при адъювантном артрите, диабетической ретинопатии и септической кардиомиопатии, предупреждает развитие синдрома поликистозных яичников, атеросклероза и новообразований и др. [6-11]. На основе мелатонина созданы лекарственные препараты, например мелаксен, а также его синтетические аналоги, в частности, антидепрессант агомелатин, агонисты рамелтеон, циркадин и др., которые широко применяют в клинической практике. Основная причина универсальных защитных свойств мелатонина - ограничение окислительного стресса, восстановление продукции нейротрофинов и модуляция любых патологических процессов; также он при нейродегенеративных заболеваниях головного мозга ограничивает воспаление, аккумуляцию в нейронах а-синуклеина и накопление нейротоксичного β-амилоида, ослабляет митохондриальную дисфункцию и деградацию медиаторов. Он сам в качестве лекарственного средства малотоксичен, относительно безопасен, и его используют в клинике как самостоятельно, так и в комбинации с другими лекарствами [8, 12–14].

Как известно, у человека и животных (у кошек, собак и приматов) теменная ассоциативная кора (расположена позади I соматосенсорной зоны коры) — область глобального межанализаторного взаимодействия, играющая важную роль в обеспечении мультисенсорной интеграции и в продуцировании запланированных движений, представляющая

важнейший дискриминационно-интегративный аппарат больших полушарий, принимающая участие в дефиците восприятия и памяти при пространственном взаимодействии, нарушении дотягивания и хватания, контроля движения глаз, внимания, а также в патогенезе БД за счет дисбаланса эфферентно-афферентных процессов кортикального уровня [15–18].

Ранее было показано, что комбинации мелатонина с отечественным лекарственным препаратом мексидолом (производное 3-гидроксипиридина – этилметилгидроксипиридина сукцинат, которое широко применяют в различных областях медицины), а также новым производным 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 оказывают выраженное антиамнестическое и вестибулопротекторное действие у животных, превосходя свои компоненты [19].

Однако действие комбинаций мелатонина с мексидолом и новыми производными 3-гидроксипиридина на теменную ассоциативную кору у животных совсем не изучено. Поэтому целью данного исследования явилось изучение действия комбинаций мелатонина с мексидолом и новыми производными 3-гидроксипиридина на нейроны поля 5 теменной ассоциативной коры кошек.

Методика

Электрофизиологические эксперименты проводили на 8 обездвиженных миорелаксантами кошках-самцах массой 3,2-3,7 кг, находящихся на искусственной вентиляции легких. Все хирургические манипуляции осуществляли в условиях общей анестезии барбитуратами (внутрибрюшинно этаминал-натрий в дозе 35 мг/кг). Внеклеточную регистрацию биоэлектрической активности отдельных нейронов поля 5 (по Бродману) теменной ассоциативной коры и микроионофорез/пневмомикроинъекцию (давление 3-10 psi; 1 psi ≈ 6894,76 Па) веществ осуществляли с помощью многоканальных стеклянных микроэлектродов (регистрирующий канал микроэлектрода заполняли 3 М раствором натрия хлорида; сопротивление, измеренное по постоянному току, составляло 5-10 МОм) и общепринятой микроэлектродной и регистрирующей техники. В основном оценивали спонтанную активность нейронов, анализ которой проводили с помощью аналитико-регистрирующего комплекса на базе компьютера, снабженного пакетом специализированных программ для исследования спонтанной активности. Учитывали только такое изменение спонтанной активности (угнетение или возбуждение), если оно было более 25 % по сравнению с исходным уровнем импульсации. Более подробно методика описана ранее в работе [20].

В работе использовали новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119, синтезированные и любезно предоставленные докт. хим. наук, профессором С.Я. Скачиловой (АО «ВНЦ БАВ», РФ), мексидол (ЗАО «Фармасофт», РФ) и мелатонин (Sigma-Aldrich, США).

К отдельному нейрону сначала подводили мелатонин, а затем мексидол или новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119 (с помощью пневмомикроинъекции; давление 3–10 psi).

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

Было обнаружено, что новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119 (при пневмомикроинъекции) оказывали сходное действие на спонтанную активность нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек (таблица).

Так, ИБХФ-27 и СК-119 главным образом угнетали фоновую импульсацию нейронов (у 81,3 и 48,6 % клеток соответственно), а усиление спонтанной активности встречалось очень редко (у 3,1 и 5,7 % клеток соответственно). Следовательно, ИБХФ-27 оказывал прямое влияние (сумма угнетающего и возбуждающего эффектов) на 84,4 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек, что значимо (р < 0,01) в 1,6 раза больше, чем СК-119. Кроме того, угнетающий эффект у ИБХФ-27 наблюдался в 1,7 раза чаще (р < 0,01), чем у СК-119. Тормозная реакция на пневмомикроинъекцию ИБХФ-27 и СК-119 встречалась соответственно в 26 и 8,5 раза чаще (р < 0,001), чем возбуждающая.

Лекарственные препараты мексидол и мелатонин также в основном подавляли фоновую импульсацию нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры (у 59,4 и 60,6 % клеток соответственно), а усиление спонтанной активности встречалось довольно редко (у 9,4 и 15,2 % клеток соответственно) (см. табл.). Следовательно, мексидол и мелатонин оказывали прямое влияние на 68,8 и 75,8 % нейронов соответственно, при этом тормозная реакция на пневмомикроинъекцию препаратов встречалась соответственно в 6,3 и 4 раза чаще (р < 0,001), чем возбуждающая.

При сравнении с действием мексидола на нейроны поля 5 теменной ассоциативной коры выявлено, что угнетающий эффект у ИБХФ-27 отмечался в 1,4 раза чаще (р < 0.05). Следовательно, ИБХФ-27 действует более выраженно, чем мексидол.

Установлено, что комбинации мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом главным образом угнетали фоновую импульсацию нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры (у 98,0; 84,8 и 86,8 %

Прямое влияние мелатонина, производных 3-гидроксипиридина и их комбинаций (при пневмомикроинъекции) на спонтанную активность нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек

Вещество	Всего нейронов	Эфф	ект	
		Возбуждающий	1 (3,1 %)	
ИБХФ-27	32 (100 %)	Угнетающий	26 (81,3 %) ^{##,α}	
		Отсутствует	5 (15,6 %)	
		Возбуждающий	2 (5,7 %)	
CK-119	35 (100 %)	Угнетающий	17 (48,6 %)	
		Отсутствует	16 (45,7 %)	
		Возбуждающий	3 (9,4 %)	
Мексидол	32 (100 %)	Угнетающий	19 (59,4 %)	
		Отсутствует	10 (31,2 %)	
		Возбуждающий	5 (15,2 %)	
Мелатонин	33 (100 %)	Угнетающий	20 (60,6 %)	
		Отсутствует	8 (24,2 %)	
	Комбина	ции веществ		
	49 (100 %)	Возбуждающий	0 (0 %)	
Мелатонин + ИБХФ-27		Угнетающий	48 (98,0 %)*,βββ,§,□	
		Отсутствует	1 (2,0 %)	
	9 46 (100 %)	Возбуждающий	1 (2,2 %)	
Мелатонин + СК-119		Угнетающий	39 (84,8 %) ^{###,β}	
		Отсутствует	6 (13,0 %)	
		Возбуждающий	1 (2,6 %)	
Мелатонин + мексидол	38 (100 %)	Угнетающий	33 (86,8 %)αα,β	
		Отсутствует	4 (10,6 %)	

Примечание. Различия с аналогичными эффектами веществ и их комбинаций статистически значимы (точный метод Фишера): с ИБХФ-27: * − p < 0,05; с СК-119: $^{#}$ − p < 0,01, $^{#}$ − p < 0,001; с мексидолом: $^{\alpha}$ − p < 0,05, $^{\alpha\alpha}$ − p < 0,01; с мелатонином: $^{\beta}$ − p < 0,05, $^{\beta\beta}$ − p < 0,001; с комбинацией мелатонина и СК-119: $^{\$}$ − p < 0,05; с комбинацией мелатонина и мексидола: $^{\Box}$ − p < 0,05.

клеток соответственно), а усиление спонтанной активности либо не отмечалось (комбинация мелатонина с ИБХФ-27), либо встречалось крайне редко (у 2,2 и 2,6 % клеток соответственно для комбинаций мелатонина с СК-119 и мексидолом). Следовательно, комбинации мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом оказывают прямое влияние на 98,0; 87,0 и 89,4 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры соответственно, при этом тормозная реакция на пневмомикроинъекцию комбинаций мелатонина с СК-119 и мексидолом встречалась соответственно в 39 и 33 раза чаще (р < 0,001), чем возбуждающая.

Угнетающий эффект комбинаций мелатонина с ИБХФ-27 наблюдался в 1,2 (p < 0,05) и 1,6 раза (p < 0,001) чаще, чем у ее компонентов ИБХФ-27 и мелатонина соответственно, а также в 1,2 и 1,1 раза чаще (p < 0,05), чем у комбинаций мелатонина с СК-119 и мексидолом соответственно. Кроме того, данная комбинация оказывала прямое влияние на нейроны в 1,2 (p < 0,05), 1,3 (p < 0,01) и 1,1 раза (p < 0,05) чаще, чем ИБХФ-27, мелатонин и комбинация мелатонина с СК-119 соответственно.

Угнетающий эффект комбинации мелатонина с СК-119 отмечался в 1,7 (р < 0,001) и 1,4 раза

(p < 0.05) чаще, чем у ее компонентов СК-119 и мелатонина соответственно, а прямое влияние на нейроны — в 1,6 (p < 0.01) чаще, чем у СК-119.

Угнетающий эффект комбинации мелатонина с мексидолом наблюдался соответственно в 1,5 (p < 0,001) и 1,4 (p < 0,05) раза чаще, чем у ее компонентов в отдельности, а прямое влияние на нейроны — в 1,3 (p < 0,05) чаще, чем у мексидола.

Итак, новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119, лекарственные препараты мексидол и мелатонин, а также комбинации мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом оказывают прямое влияние на 84,4; 54,3; 68,8; 75,8; 98,0; 87,0 и 89,4 % нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек соответственно, при этом угнетающий эффект у ИБХФ-27 наблюдался в 1,7 и 1,4 раза чаше, чем у СК-119 и мексидола. В свою очередь, у комбинаций мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом угнетающий эффект на нейроны поля 5 теменной ассоциативной коры наблюдается чаще, чем у их компонентов в отдельности, а прямое влияние у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 – чаще, чем у ее компонентов. Более того, у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 угнетающий эффект наблюдается чаще, чем у 2 других комбинаций – мелатонина с СК-119 и

мексидолом, а прямое влияние на нейроны – чаще, чем у комбинации мелатонина с СК-119.

Полученные нами данные хорошо согласуются с литературными. Так, например, было показано, что у мышей на модели амнезии, вызванной скополамином, комбинации мелатонина (5 мг/кг) с мексидолом (25 мг/кг) или ИБХФ-27 (25 мг/кг) оказывают выраженное антиамнестическое действие, превосходя свои компоненты. Кроме того, в сходных экспериментальных условиях у кошек установлено, что другие новые производные 3-гидроксипиридина — СК-132, СК-170 и СК-171 (при пневмомикроинъекции) — оказывали прямое влияние на большую часть нервных клеток поля 5 теменной ассоциативной коры, при этом тормозная реакция встречалась во много раз чаще, чем возбуждающая [19].

Таким образом, можно заключить, что из 3 испытанных комбинаций наиболее выражено действует комбинация мелатонина с ИБХФ-27. Следовательно, поле 5 теменной ассоциативной коры играет важную роль в реализации центрального действия указанных комбинаций веществ.

Выводы

- 1. Новые производные 3-гидроксипиридина ИБХФ-27 и СК-119, а также лекарственные препараты мексидол и мелатонин оказывают прямое влияние на большую часть нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры кошек, при этом угнетающий эффект у ИБХФ-27 наблюдается в 1,7 и 1,4 раза чаше, чем у СК-119 и мексидола.
- 2. Комбинации мелатонина с ИБХФ-27, СК-119 и мексидолом оказывают прямое влияние на большую часть нейронов поля 5 теменной ассоциативной коры. Угнетающий эффект комбинаций на нейроны наблюдается чаще, чем у их компонентов в отдельности, а прямое влияние у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 чаще, чем у ее компонентов. Более того, у комбинации мелатонина с ИБХФ-27 угнетающий эффект отмечается чаще, чем у 2 других комбинаций мелатонина с СК-119 и мексидолом, а прямое влияние на нейроны чаще, чем у комбинации мелатонина с СК-119.
- 3. Поле 5 теменной ассоциативной коры играет важную роль в реализации центрального действия указанных выше комбинаций веществ.

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН № 65.2.

Список литературы

1. Газенко О.Г., Григорьев А.И., Егоров А.Д. Космическая медицина: вчера, сегодня, завтра // Наука в России. 2006. № 4. С. 4-11.

Gazenko O.G., Grigoriev A.I., Egorov A.D. Space medicine: yesterday, today, tomorrow // Nauka v Rossii. 2006. № 4. P 4–11

- 2. Cohen B., Dai M., Yakushin S.B., Cho C. The neural basis of motion sickness // J. Neurophysiol. 2019. V. 121. \mathbb{N}° 3. P. 973–982.
- 3. *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. Nº 1. P. 30–36.

- 4. Koch A., Cascorbi I., Westhofen M. et al. The neurophysiology and treatment of motion sickness // Dtsch. Arztebl. Int. 2018. V. 115. Nº 41. P. 687–696.
- 5. Reschke M.F., Wood S.J., Clément G.R. A case study of severe space motion sickness // Aerospace Med. Hum. Perform. 2018. V. 89. № 8. P. 749–753.
- 6. *Арушанян Э.Б.* Мелатонин и деятельность печени // Эксперим. и клин. фармакология. 2018. Т. 81. № 11. С. 32–37.

Arushanyan E.B. Melatonin and liver activity // Eksperimentalnaya i klinicheskaya farmakologiya. 2018. V. 81. № 11. P. 32–37.

7. Арушанян Э.Б., Семенов С.В., Боташева В.С., Наумов С.С. Сравнительное влияние целекоксиба, мелатонина и их комбинации на гематологические и морфологические показатели воспалительного процесса у крыс с формалиновым артритом // Там же. № 6. С. 20-23.

Arushanyan E.B., Semenov S.V., Botasheva V.S., Naumov S.S. Comparative study of the influence of celecoxib, melatonin, and their combination on hematological and morphological indices of inflammatory process in rats with formalin-induced arthritis // Ibid. N^{o} 6. P. 20–23.

8. *Арушанян Э.Б., Наумов С.С., Щетинин Е.В.* Мелатонин и нейродегенеративные процессы в головном мозге // Там же. 2019. Т. 82. № 2. С. 32–37.

Arushanyan E.B., Naumov S.S., Shchetinin E.V. Melatonin and neurodegeneration in the brain // Ibid. 2019. V. 82. N° 2. P. 32–37.

- 9. Lombardi L.A., Mattos L.S., Simões R.S. et al. Melatonin may prevent or reverse polycystic ovary syndrome in rats // Rev. Assoc. Med. Bras. (1992). 2019. V. 65. № 7. P. 1008–1014.
- 10. Ma Y., Zhao Q., Shao Y. et al. Melatonin inhibits the inflammation and apoptosis in rats with diabetic retinopathy via MAPK pathway // Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci. 2019. \mathbb{N}° 23 (3 Suppl.). P. 1–8.
- 11. Zhong J., Tan Y., Lu J. et al. Therapeutic contribution of melatonin to the treatment of septic cardiomyopathy: a novel mechanism linking Ripk3-modified mitochondrial performance and endoplasmic reticulum function // Redox. Biol. 2019. \mathbb{N}° 26:101287.
- 12. Арушанян Э.Б., Щетинин Е.В. Мелатонин как универсальный модулятор любых патологических процессов // Патол. физиология и эксперим. терапия. 2016. Т. 60. \mathbb{N}° 1. С. 79–88.

Arushanyan E.B., Shetinin E.V. Melatonin as universal modulator of any pathological processes // Patologicheskaya

fiziologiya i eksperimentalnaya terapiya. 2016. V. 60. \mathbb{N}^{9} 1. P. 79–88.

- 13. Cardinali D.P. Melatonin: clinical perspectives in neurodegeneration // Front. Endocrinol. (Lausanne). 2019. N_{2} 10:480.
- 14. *Tamtaji O.R., Reiter R.J., Alipoor R. et al.* Melatonin and Parkinson disease: current status and future perspectives for molecular mechanisms // Cell. Mol. Neurobiol. 2019. Aug 6. DOI: 10.1007/s10571-019-00720-5.
- 15. *Батуев А.С.* Нейрофизиология коры головного мозга: модульный принцип организации. Л., 1984.

Batuev A.S. Neurophysiology of the cerebral cortex: the modular principle of the organization. Leningrad, 1984.

16. Правдивцев В.А., Козлов С.Б., Яснецов В.В. Эфферентно-афферентная конвергенция как структурно-функциональная основа аппарата акцептора результатов действия // Успехи физиологических наук. 1997. Т. 28. № 4. С. 33—44.

Pravdivtsev V.A., Kozlov S.B., Yasnetsov V.V. Efferent-afferent convergence as a structural-functional basis for a mechanism of an acceptor of action results // Uspekhi fiziologicheskih nauk. 1997. V. 28. N^{o} 4. P. 33–44.

17. 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.

Korenuyk I.I., Kolotilova O.I. Morphofunctional organization of the integrative activity of the parietal associative cortex (fields 5 and 7) // Uchenye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. 2008. V. 21. \mathbb{N}° 2. P. 55–91.

- 18. Silson E.H., Steel A., Kidder A. et al. Distinct subdivisions of human medial parietal cortex support recollection of people and places // Elife. 2019. N° 8. pii: e47391.
- 19. Яснецов В.В., Яснецов Вик.В. Фармакологическая профилактика и терапия болезни движения у человека и животных // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. \mathbb{N}^{9} 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.

20. Яснецов В.В., Правдивцев В.А., Крылова И.Н. и др. Влияние ноотропов на импульсную активность

нейронов коры большого мозга // Эксперим. и клин. фармакология. 2001. Т. 64. № 6. С. 3—6.

Yasnetsov V.V., Pravdivtsev V.A., Krylova I.N. et al. Effect of nootropic agents on impulse activity of cerebral cortex neurons // Eksperimentalnaya i klinicheskaya farmakologiya. 2001. V. 64. N_2 6. P. 3–6.

Поступила 02.10.2019

EFFECT OF MELATONIN COMBINED WITH 3-HYDROXYPYRIDINE DERIVATIVES ON NEURONS OF THE PARIETAL ASSOCIATION CORTEX IN THE BRAIN OF ANIMALS

Yasnetsov Vik.V., Ivanov Yu.V., Karsanova S.K., Yasnetsov V.V.

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

Experiments with cats showed that new 3-hydroxypyridine derivatives IBKhF-27 and SK-119, drugs mexidol and melatonin, and melatonin combinations with IBKhF-27, SK-119 and mexidol influenced directly 84.4; 54.3; 68.8; 75.8; 98; 87 and 89 % neurons of the parietal association cortex field-5, respectively. Inhibition by IBKhF-27 was observed in 1.7 and 1.4 times more often than by SK-119 + mexidol. Melatonin combined with IBKhF-27, SK-119 and mexidol inhibited the neurons more often, than each component of the combination separately; the direct influence of melatonin with IBKhF-27 was observed more frequently, than of each of them separately. Moreover, the inhibitory effect of melatonin + IBKhF-27 was observed more frequently than of two other combinations, i.e. melatonin + SK-119 and melatonin + mexidol; the direct effect on neurons was more often compared with melatonin + SK-119. Hence, field-5 of the parietal association cortex is an important contributor to realization of the central effect of these combinations of substances.

Key words: new 3-hydroxypyridine derivatives, melatonin, mexidol, combination, field-5 of the parietal association cortex, cats.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 84–88.

УДК 612.133

ПРОИЗВОЛЬНАЯ БЕГОВАЯ ТРЕНИРОВКА САМОК КРЫС ВО ВРЕМЯ БЕРЕМЕННОСТИ: ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Борзых А.А.¹, Кузьмин И.В.², Кирюхина О.О.³, Селиванова Е.К.², Швецова А.А.², Лазаренко В.С.², Лос Аркос Уварова С.², Нестеренко А.М.^{4, 5}, Тарасова О.С.^{1, 2}

E-mail: borzykh.anna@gmail.com

Цель данной работы – оценить динамику показателей бега в колесе беременных самок (БС) крыс и влияние такой тренировки на показатели системной гемодинамики, гормональные и биохимические показатели крови (18-е сутки беременности), а также на исход беременности. Сходные исследования были проведены для небеременных самок (НС). БС проявляли беговую активность в течение всей беременности (3 нед). Суточный пробег не различался у НС и БС в течение первых 12 дней тренировки, но затем снижался у БС; скорость в интервалах бега не различалась между группами. В обеих группах (НС и БС) бег в колесе не оказывал влияния на массу тела и частоту сердечных сокращений, однако уровень систолического артериального давления у тренированных БС был несколько выше, чем у контрольных БС. В отсутствие регулярной физической нагрузки в крови БС по сравнению с НС были выявлены повышение содержания прогестерона, метаболитов NO и мочевины, но снижение содержания тироксина (T_4) и трийодтиронина (T_5) . Тренировка при беременности потенцировала прирост прогестерона и оказывала стабилизирующее влияние на состояние тиреоидной оси. Средняя масса крысят в пометах тренированных и нетренированных БС не различалась, хотя после тренировки количество крысят в пометах было больше. Таким образом, бег в колесе сопровождается развитием в организме самок крыс изменений, благоприятных для протекания беременности. Разработанная методика может быть использована для профилактики или коррекции состояния организма самок в экспериментальных моделях патологии беременности.

Ключевые слова: крысы, беременность, физическая тренировка, произвольный бег, гормональный статус, биохимия крови, артериальное давление.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 89-95.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-89-95

Регулярная физическая нагрузка, прежде всего в аэробном режиме, эффективно применяется для профилактики и коррекции двигательных, сердечно-сосудистых, респираторных и неврологических расстройств [1-4]. В женском организме нарушения в работе этих систем встречаются и во время такого сложного физиологического состояния, как беременность. Согласно сформировавшимся к настоящему времени представлениям, регулярная физическая нагрузка полезна для организма матери, поскольку она способствует нормализации плацентарного кровотока, потенцируя синтез оксида азота в эндотелии сосудов [5, 6]. Однако механизмы влияния физической тренировки на женский организм во время беременности изучены явно недостаточно, в связи с чем нужны экспериментальные исследования, в том числе, с использованием лабораторных животных.

При физической тренировке беременных самок (БС) крыс требуется создание соответствующих условий проведения эксперимента. Такие широко используемые методики тренировки, как принудительное плавание или бег на тредбане, являются стрессогенными и не обеспечивают естественный для крыс паттерн двигательной активности (сравнительно короткие интервалы бега, разделенные периодами отдыха). Вместе с тем у крыс существует внутренняя мотивация к движению, она не может быть реализована при групповом содержании в обычных клетках, но ярко проявляется, если клетка снабжена беговым колесом. Показано, что произвольная тренировка крыс не сопряжена с повышением содержания кортикостерона в крови [7] или же подавлением активности гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной оси [8-10], в отличие от тренировки на тредбане [7, 11]. Поскольку произвольная тренировка в колесе обладает очевидными преимуществами по сравнению другими видами задания

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

⁴Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

⁵Институт биоорганической химии им. акад. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва

нагрузки, она может служить перспективным подходом для тренировки БС крыс.

Цель данной работы – оценить динамику показателей бега в колесе БС крыс и влияние такой тренировки на показатели системной гемодинамики, гормональные и биохимические показатели крови, а также исход беременности.

Методика

В работе использовали половозрелых самцов и самок крыс Вистар. Животных содержали в помещении вивария с контролируемой температурой (21–23 °C) и световым циклом 12 ч «день» — 12 ч «ночь», включение освещения в 8.00, выключение в 20.00. Воду и стандартный корм для грызунов (ООО «Лабораторкорм», Москва) крысы получали ad libitum. Программа исследования была одобрена Комиссией по биомедицинской этике МГУ им. М.В. Ломоносова (протокол № 94-ж от 27.06.2019 г.).

Физическую тренировку самок крыс проводили в произвольном режиме нагрузки (бег в колесе) с 1-го дня беременности до родов. Для тренировки использовали разработанный нами аппаратно-программный комплекс ASPAM (https://github.com/ comcon1/ASPAM). Для адаптации к условиям эксперимента в течение недели самок крыс содержали попарно в клетках стандарта Т4, снабженных беговым колесом. Затем самок помещали на ночь в клетку к самцам. Самки, у которых на следующее утро (между 7.30 и 8.00 ч) в вагинальном мазке обнаружены сперматозоиды (БС), были рассажены в такие же клетки, но разделенные сетчатой перегородкой на 2 отсека. При этом одна из самок (из группы «Бег») находилась в отсеке с беговым колесом, а вторая (из группы «Контроль») – в отсеке без колеса. В течение всего эксперимента крысы могли «контактировать» через отверстия в перегородке - такое попарное содержание позволяло избежать социальной изоляции, которая вызывает у животных стресс и изменения в работе сердечно-сосудистой системы [12]. Параллельно были сформированы 2 группы НС («Бег» и «Контроль»), которых содержали в таких же условиях.

Регистрацию беговой активности крыс проводили путем подсчета оборотов колеса. На колесе диаметрально по отношению друг к другу были установлены 2 магнита, что позволяло регистрировать каждый полуоборот колеса в момент прохождения магнита перед детектором. Для сбора и анализа данных использовали оригинальное программное обеспечение. В эксперименте регистрировали количество полуоборотов в интервалах длительностью 5 с, затем вычисляли пробег за сутки. Кроме того, для каждого из 5-с интервалов вычисляли мгновенные значения скорости бега. Программа

обеспечивала дистанционный контроль хода эксперимента через сеть Интернет в любое время суток.

Неинвазивное измерение систолического АД и частоты сердечных сокращений (ЧСС) до и на заключительном этапе беременности/тренировки (18–20-й день) проводили плетизмографическим методом tail cuff с использованием системы «Систола» («Нейроботикс», Россия, https://neurobotics.ru/catalog/fiziologiya-zhivotnyix/sistemyi-izmereniya-krovyanogo-davleniya/sistola/).

Образцы крови для гормонального и биохимического анализа получали на 18-й день тренировки/ беременности. Крысе надрезали кончик хвоста, собирали порцию крови (0,5 мл) в пробирку с $\rm K_3$ ЭДТА, центрифугировали (4500 об/мин в течение 15 мин), отбирали плазму и замораживали ее при -20 °C до проведения анализа.

Содержание гормонов в плазме крови определяли методом иммуноферментного анализа: уровень прогестерона, тестостерона, общего тироксина (T_4) и свободного трийодтиронина (T_3) с использованием наборов ЗАО «НВО Иммунотех» (Россия), а эстрадиола — набора DGR International (Германия). Содержание общего холестерина определяли с использованием набора «Хоспитекс Диагностикс» (Россия), а креатинина и мочевины — набора «Ольвекс Диагностикум» (Россия). Суммарное содержание нитритов и нитратов в плазме крови определяли по методу Грисса в нашей модификации [13].

Статистическая обработка результатов. Данные в таблице и на рисунках представлены в виде среднего и стандартного отклонений. Полученные результаты по количеству и массе крысят в помете представлены в виде медианы и межквартильного размаха. Статистический анализ данных проводили в программе GraphPad Prism 7.0. Характер распределения данных оценивали с использованием критерия Шапиро – Вилка. В случае нормально распределенных данных применяли параметрические критерии: при анализе динамики показателей беговой активности использовали дисперсионный анализ для повторных измерений, а при анализе показателей гемодинамики и крови – дисперсионный анализ, в обоих случаях применяли поправку Сидака на множественные сравнения. При сравнении выборок, характер распределения которых отличался от нормального (данные о количестве и массе тела крысят в пометах), использовали критерий Манна -Уитни. Различия считали статистически значимыми при p < 0.05.

Результаты и обсуждение

Беременные самки, как и небеременные, без принуждения регулярно выполняли физическую нагрузку. Бег в колесе не оказывал влияния на массу

Таблица

Значения САД и ЧСС у небеременных и беременных самок в начале
и в конце цикла произвольной беговой тренировки

F	До беременно	ти/тренировки	18-20-й день беременности/тренировки				
Группы	САД, мм рт. ст. ЧСС, уд/мин		САД, мм рт. ст.	ЧСС, уд/мин			
Небеременные							
Контроль (n = 7)	122,6 ± 5,5	378 ± 32	123,3 ± 7,2	403 ± 49			
Eer $(n = 5)$ 123,0 ± 5,0		410 ± 29 122,8 ± 8,8		397 ± 49			
Беременные							
Контроль (n = 12)	121,3 ± 6,1	414 ± 41	115,8 ± 5,9	417 ± 28			
Бег (n = 5)	121,6 ± 7,0	415 ± 51	125,6 ± 4,6*	426 ± 24			

Примечание. Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения. *-p < 0.05 по сравнению с группой беременных контрольных самок (дисперсионный анализ с поправкой Сидака). Число в скобках — количество животных в группе.

тела БС и НС (рис. 1, A). Суточный пробег сначала не различался между группами, но был уменьшен в группе БС по сравнению с НС с 13-го дня после зачатия (см. рис. 1, Б). Скорость в интервалах бега также несколько снижалась во второй половине беременности, но статистически значимых различий по этому показателю между группами БС и НС выявлено не было (см. рис. 1, В). Таким образом, в первой половине беременности показатели беговой активности самок были сопоставимы с таковыми НС, а также у самцов в проведенных нами ранее исследованиях [14, 15]. Следует отметить, что самки крыс более склонны к бегу в колесе по сравнению с самцами [16].

Значения систолического АД и ЧСС в начале эксперимента не различались между экспериментальными группами (таблица). Через 18 дней после зачатия и/или начала тренировочного цикла бег в колесе не оказывал влияния на уровень систолического АД у НС, однако у БС уровень АД после тренировки был несколько выше, чем в контрольной группе (не наблюдалось снижения АД к концу беременности) (см. табл.). Полагаем, что такое повышение АД связано с более выраженной реакцией тренированных самок на помещение их в рестрейнер при использовании метода tail cuff, несмотря на предварительную адаптацию к условиям эксперимента. Вероятно, для оценки влияния произвольной тренировки на гемодинамику при беременности необходимо использовать методы, не сопряженные с вызванным иммобилизацией стрессированием животных: такие как измерение АД с использованием имплантированного в артерию катетера или телеметрического датчика [17].

Результаты определения комплекса гормональных и биохимических показателей плазмы крови приведены на рис. 2. В крови БС по сравнению с небеременными наблюдалось повышение содержания прогестерона (см. рис. 2, A), что характерно для крыс на исследованном нами сроке беременности (для крыс характерна высокая концентрация

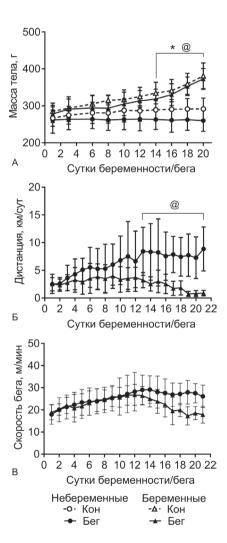


Рис. 1. Посуточные значения показателей у беременных и небеременных самок крыс: A — масса тела; B — суточный пробег (дистанция); B — скорость бега.

Количество крыс в группах: небеременные – контроль (7) и бег (9); беременные – контроль (5) и бег (8).

Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонений; *-p < 0.05 по сравнению с контрольной группой НС; $^{\circ}-p < 0.05$ по сравнению с тренирующейся группой (дисперсионный анализ для повторных измерений с поправкой Сидака)

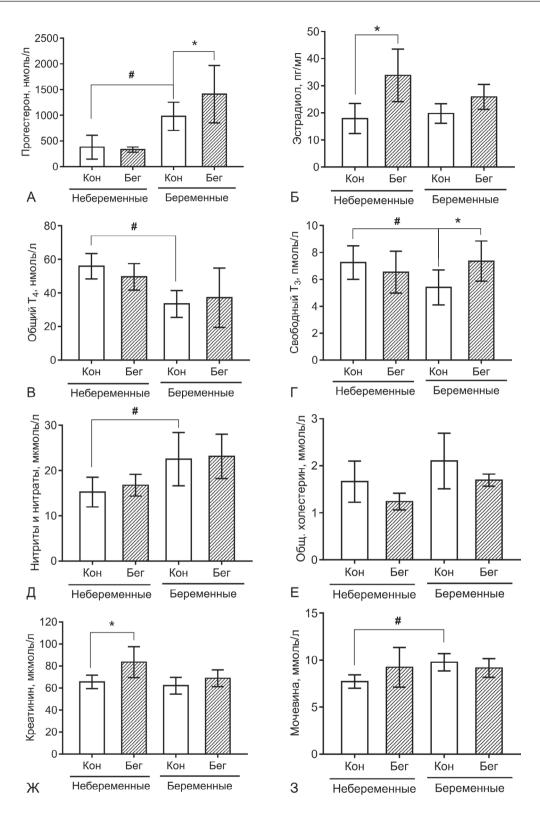


Рис. 2. Гормональные (А–Г) и биохимические (Д–3) показатели крови небеременных и беременных самок при произвольной беговой тренировке.

Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонений; $^{\#}$ – p < 0,05 – сравнение 2 контрольных групп (БС и HC); $^{\#}$ – p < 0,05 – сравнение группы «Бег» с соответствующей контрольной группой (дисперсионный анализ с поправкой Сидака).

Количество крыс в группах: небеременные – контроль (7) и бег (5); беременные – контроль (12) и бег (5)

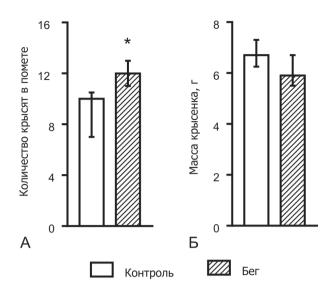


Рис. 3. Влияние произвольной беговой тренировки в колесе на исход беременности.

A — количество крысят в помете; B — масса тела крысят в 1-й день жизни.

Количество пометов: контрольных самок - 5, бегающих самок - 7. Данные представлены в виде медианы и меж-квартильного размаха; * - p < 0,05 по сравнению с группой контрольных самок (критерий Манна - Уитни)

прогестерона в крови до 20-го дня беременности, а непосредственно перед родами происходит резкое снижение) [18]. Бег в колесе не оказывал влияния на содержание прогестерона у НС, но повышал его у БС, что можно трактовать как благоприятный эффект тренировки на протекание беременности.

Содержание эстрадиола у БС не было повышенным по сравнению с небеременными (см. рис. 2, Б). Следует отметить, что у самок крыс изменение концентрации эстрадиола в крови во время беременности сравнительно невелико и менее выражено, чем в эстральном цикле [18, 19]. Регулярная физическая нагрузка сопровождалась повышением содержания эстрадиола в крови НС и не влияло на него у БС.

Концентрации обеих исследованных нами форм тиреоидных гормонов (общего тироксина и свободного трийодтиронина) в крови БС были сниженными по сравнению с НС (см. рис. 2, В, Г), что согласуется с данными других авторов [18]. Снижение тиреоидной функции к концу беременности связывают с уменьшением доступности йода для щитовидной железы матери в силу повышения почечного клиренса и транспорта через плаценту к плоду [20, 21]. Бег в колесе не влиял на состояние тиреоидной оси у небеременных крыс, т.е., как и в ряде предыдущих работ [8-10], произвольная тренировка не сопровождалась нарушением функционирования гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной оси крыс. Вместе с тем у БС физическая нагрузка приводила к умеренному повышению содержания свободного Т,

что является еще одним благоприятным эффектом тренировки.

Содержание продуктов метаболизма NO (нитритов/нитратов) в крови БС было увеличено по сравнению с НС (см. рис. 2, Д), что отражает важную роль NO в регуляции состояния сосудистого русла во время беременности. Под действием тренировки содержание продуктов метаболизма NO не изменялось, хотя можно было ожидать его повышения, по данным работ других авторов [5, 6].

Содержание общего холестерина в крови обеих тренированных групп (НС и БС) не было изменено по сравнению с соответствующими контрольными группами (см. рис. 2, Е). В дальнейшем представляется целесообразными оценивать влияние физической тренировки при беременности не только на этот, но и на другие показатели липидного обмена.

Креатинин крови не был изменен под влиянием физической нагрузки у БС, но увеличен у НС (см. рис. 2, Ж), по всей видимости, из-за более высокой интенсивности нагрузки в конце тренировочного цикла. Содержание мочевины в крови самок увеличивалось при беременности (рис. 2, 3), но не изменялось в результате физической тренировки.

Пометы тренированных самок были более крупными (см. рис. 3, A), при этом количество крысят мужского пола между группами не различалось, но наблюдалась тенденция к увеличению количества крысят женского пола (p=0,060). Важно, что средняя масса тела крысят в пометах контрольных и тренированных самок не различалась (см. рис. 3, Б).

В целом полученные результаты позволяют положительно оценить экспериментальную модель произвольной беговой тренировки БС крыс с использованием разработанного нами аппаратно-программного комплекса. Бег в колесе сопровождался развитием в организме самок крыс комплекса изменений, большинство из которых благоприятны для протекания беременности. В связи с этим актуален вопрос об использовании данной методики для профилактики и коррекции состояния организма самок в экспериментальных моделях патологии беременности.

Выводы

- 1. Беременные самки выполняют физическую нагрузку в колесе вплоть до дня родов, причем в первой половине беременности показатели их беговой активности сопоставимы с таковыми у НС.
- 2. После физической тренировки в организме БС наблюдаются гормональные и биохимические сдвиги, характерные для нормально протекающей беременности.
- 3. По изменению ряда показателей (повышение содержания прогестерона и трийодтиронина в крови) можно говорить о благоприятном влиянии

регулярной физической нагрузки на организм БС.

- 4. Размер помета у тренированных самок увеличен по сравнению с нетренированными без уменьшения массы тела крысят.
- 5. Разработанная нами методика может быть использована для профилактики или коррекции состояния организма самок в экспериментальных моделях патологии беременности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-15-00210).

Список литературы

- 1. Besnier F., Labrunée M., Pathak A. et al. Exercise training-induced modification in autonomic nervous system: An update for cardiac patients // Ann. Phys. Rehabil. Med. 2017. V. 60. № 1. P. 27–35.
- 2. Segizbaeva M.O., Timofeev N.N., Donina Zh.A. et al. Effects of inspiratory muscle training on resistance to fatigue of respiratory muscles during exhaustive exercise // Adv. Exp. Med. Biol. 2015. V. 840. P. 35–43.
- 3. Shafiee S.M., Vafaei A.A., Rashidy-Pour A. Effects of maternal hypothyroidism during pregnancy on learning, memory and hippocampal BDNF in rat pups: Beneficial effects of exercise // Neurosci. 2016. V. 329. P. 151–161.
- 4. Yung L.M., Laher I., Yao X. et al. Exercise, vascular wall and cardiovascular diseases: an update (part 2) // Sports Med. 2009. V. 39. Nº 1. P. 45–63.
- 5. Gilbert J.S., Banek C.T., Bauer A.J. et al. Exercise training attenuates placental ischemia-induced hypertension and angiogenic imbalance in the rat // Hypertension. 2012. V. 60. \mathbb{N}° 6. P. 1545–551.
- 6. Ramírez-Vélez R., Bustamante J., Czerniczyniec A. et al. Effect of exercise training on eNOS expression, NO production and oxygen metabolism in human placenta // PLoS One. 2013. V. 8. № 11. P. e80225.
- 7. Ke Z., Yip S.P., Li L. et al. The effects of voluntary, involuntary, and forced exercises on brain-derived neurotrophic factor and motor function recovery: a rat brain ischemia model // PLoS One. 2011. V. 6. \mathbb{N}° 2. P. e16643.
- 8. *Katzeff H.L., Bovbjerg D., Mark D.A.* Exercise regulation of triiodothyronine metabolism // Am. J. Physiol. 1988. V. 255. № 6. Pt 1. P. E824–E828.
- 9. Uribe R.M., Jaimes-Hoy L., Ramírez-Martínez C. et al. Voluntary exercise adapts the hypothalamus-pituitary-thyroid axis in male rats // Endocrinol. 2014. V. 155. N^{o} 5. P. 2020–2030.
- 10. Borzykh A.A., Selivanova E.K., Shvetsova A.A. et al. Changes in the expression of genes regulating calcium homeostasis in rat myocardium induced by voluntary wheel training: the role of thyroid hormones // Biochemistry (Moscow), Supplement Series A: Membrane and Cell Biology. 2020. V. 14. № 1. P. 67–73.
- 11. Wahrmann J.P., Fulla Y., Rieu M. et al. Altered myosin isoform expression in rat skeletal muscles induced by

- a changed thyroid state // Acta Physiol. Scand. 2002. V. 176. N_2 3. P. 233–243.
- 12. Sharp J.L., Zammit T.G., Azar T.A. et al. Stress-like responses to common procedures in male rats housed alone or with other rats // Contemp. Top Lab. Anim. Sci. 2002. V. 41. \mathbb{N}° 4. P. 8–14.
- 13. Sofronova S.I., Gaynullina D.K., Martyanov A.A. et al. Endogenous oestrogens do not regulate endothelial nitric oxide production in early postnatal rats // Eur. J. Pharmacol. 2015. V. 765. P. 598–605.
- 14. Gaynullina D.K., Borzykh A.A., Sofronova S.I. et al. Voluntary exercise training restores anticontractile effect of NO in coronary arteries of adult rats with antenatal / early postnatal hypothyroidism // Nitric Oxide. 2018. V. 74. P. 10–18.
- 15. Борзых А.А., Кузьмин И.В., Нестеренко А.М. и др. Динамика показателей произвольного бега крыс в течение восьми недель тренировок // Авиакосм. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 3. С. 66-73.

Borzykh A.A., Kuzmin I.V., Nesterenko A.M. et al. Dynamics of rats' voluntary run characteristics following eight weeks of training // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 3. P. 66–73.

- 16. Blaize A.N., Breslin E., Donkin S.S. et al. Maternal exercise does not significantly alter adult rat offspring vascular function // Med. Sci. Sports Exerc. 2015. V. 47. N° 11. P. 2340–2346.
- 17. Kramer K., Remie R. Measuring blood pressure in small laboratory animals // Methods Mol. Med. 2005. V. 108. P. 51–62.
- 18. Hapon M.B., Simoncini M., Via G. et al. Effect of hypothyroidism on hormone profiles in virgin, pregnant and lactating rats, and on lactation // Reproduction. 2003. V. 126. N° 3. P. 371–382.
- 19. Matos J.F., Americo M.F., Sinzato Y.K. et al. Role of sex hormones in gastrointestinal motility in pregnant and non-pregnant rats // World J. Gastroenterol. 2016. V. 22. N^2 25. P. 5761–5768.
- 20. Choksi N.Y., Jahnke G.D., St Hilaire C. et al. Role of thyroid hormones in human and laboratory animal reproductive health // Birth Defects Res. B Dev. Reprod. Toxicol. 2003. V. 68. \mathbb{N}° 6. P. 479–491.
- 21. *Pearce E.N.* Thyroid disorders during pregnancy and postpartum // Best Pract. Res. Clin. Obstet. Gynaecol. 2015. V. 29. № 5. P. 700–706.

Поступила 18.12.2019

VOLUNTARY RUNNING TRAINING OF FEMALE RATS DURING GESTATION: CHARACTERISTICS OF AN EXPERIMENTAL MODEL

Borzykh A.A.¹, Kuzmin I.V.², Kiryukhina O.O.³, Selivanova E.K.², Shvetsova A.A.², Lazarenko V.S.²,Los-Arkos Uvarova S.², Nesterenko A.M.^{4, 5}, Tarasova O.S.^{1, 2}

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

²Lomonosov Moscow State University

³Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow

⁴Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Lomonosov Moscow State University

⁵Shemyakin–Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow

The purpose was to assess wheel running dynamics of pregnant rats (PRs) and effects of this training on central hemodynamics, hormonal and biochemical blood indices (day 18 of pregnancy), and pregnancy outcome. Similar

investigations were performed with nonpregnant rats (NPRs). PRs went on running all through three weeks of pregnancy. During the initial 12 days of training. BPRs and PRs did not differ in the daily run; subsequently, PRs were reducing daily distance, although the running speed did not differ between of the groups. Wheel-running did not affect body mass and heart rate in either PRs or NPRs; however, systolic blood pressure in trained PRs was somewhat higher than in control PRs. In the absence of regular training blood levels of progesterone, urea and NO metabolites were higher, while those of thyroxin (T_4) and triiodothyronine (T_3) were lower in PRs compared to NPs. Training potentiated an increase in progesterone and stabilized the thyroid axis during pregnancy. Mean body mass of pups from the trained and control PRs litters did not differ; however, after training the number of pups in the litters was higher. To summarize, wheel-running induces changes favorable to the pregnancy progress. This procedure can be used in correction of female health state in rodent experimental models of pathologic pregnancy conditions.

Key words: rats, pregnancy, exercise training, voluntary running, hormonal status, blood biochemistry, blood pressure.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 89–95.

УДК 577.356+57.033

ВОДА КАК ИНДИКАТОР КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Белишева Н.К.¹, Цетлин В.В.², Мартынова А.А.¹, Соловьевская Н.Л.¹, Завадская Т.С.¹, Пряничников С.В.¹, Мегорский В.В.¹

¹Научно-исследовательский центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», г. Апатиты, Мурманская область

E-mail: natalybelisheva@mail.ru; v_tsetlin@mail.ru

Проведена оценка степени сопряженности между флуктуациями свойств воды, вариациями космофизических агентов и динамикой психофизиологических показателей состояния организма для выявления свойств воды как индикатора воздействия внешней среды на организм человека. Психофизиологическая оценка функционального состояния организма человека проводилась на группе добровольцев (43 человека), в п. Баренцбург, архипелага Шпицберген, в период с 30 июля по 18 августа 2018 г. на основе ежесуточной регистрации интегральных показателей состояния организма с применением метода газоразрядной визуализации, оценки состояния сердечно-сосудистой системы, свертываемости крови, психоэмоционального состояния. Свойства воды как индикатора интегрального воздействия физико-химических процессов в окружающей среде оценивали на основе окислительно-восстановительного потенциала (ОВП, мВ) воды с применением иономера типа И-160МИ. Показано, что флуктуации ОВП воды в условиях архипелага Шпицберген связаны с характеристиками солнечного ветра и потоков солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см, а также с психофизиологическими показателями состояния организма. Выявлена возможность, на основании показателей ОВП воды вне организма, прогнозировать состояние организма. Исследования показали, что вода представляет собой индикатор, чувствительный к воздействию космофизических агентов. Колебания значений ОВП воды отражаются в синхронных колебаниях функционального состояния биологических систем, что позволяет считать такой детектор моделью, имитирующей состояние водной среды в организме. Предлагается использовать индикаторные свойства воды для изучения интегрального воздействия среды на организм человека в обитаемых космических аппаратах.

Ключевые слова: вода, окислительно-восстановительный потенциал, космофизические агенты, организм.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 96—104.

DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-96-104

Изучение интегральных эффектов воздействия среды на организм человека в обитаемых космических аппаратах требует специальных датчиков, при этом показания датчика должны отражать воздействие космофизических агентов внутри обитаемой станции и соотноситься с определенным психофизиологическим состоянием организма. Исследования последних лет выявили, что вода могла бы выполнять функции такого датчика, поскольку свойства воды при различных методах детектирования постоянно меняются с различной периодичностью и отражают динамические характеристики геофизической среды [1-4]. Предварительные данные показали, что изменение свойств воды также сопряжено с динамикой функционального состояния организма [4, 5].

Свойства воды как возможного индикатора внешних воздействий в определенной мере обусловлены ее структурными особенностями: дипольной структурой (полярностью) молекул воды, разветвленными водородными связями, распределенными по объему воды и сгруппированными в различные ассоциаты и кластеры. Структура и метастабильность воды обусловливают ее свойства не только откликаться на внешнее воздействие любой природы [6], но и сохранять изменения после различных воздействий [7]. Возможно, высокая чувствительность воды к внешнему воздействию связана с так называемым СПЕ-эффектом [7], который заключается в возбуждении объемных молекулярных волн дециметрового диапазона (СВЧ) под воздействием низкоинтенсивного облучения миллиметрового диапазона (КВЧ) [7-10].

Для использования воды как индикатора интегрального воздействия среды обитания в космических аппаратах на организм человека необходимо было также установить соответствие между изменениями в свойствах воды и психофизиологическими характеристиками организма. Такие исследования требуют реализации специальных условий, предполагающих:

²Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

- 1. Одновременное воздействие на воду и на организм человека наземных физических агентов, связанных с солнечной активностью (СА) и порожденных физическими процессами в околоземном пространстве.
- 2. Возможность длительного сопряженного детектирования флуктуаций свойств воды и динамики психофизиологических показателей.
- 3. Выбор психофизиологических показателей состояния организма человека, отклонения которых от физиологической нормы критичны в космических условиях.

Наиболее подходящим местом для выполнения первого условия являются полярные широты, где космофизические агенты проявляются на Земле максимальным образом. Это касается прежде всего авроральной зоны и в предельном выражении манифестации космофизических агентов у поверхности Земли – области полярного каспа, где располагается арх. Шпицберген (между 76°26' и 80°50' северной широты и 10° и 32° восточной долготы) [11]. Касп представляет собой своеобразную воронку на дневной стороне магнитосферы, с величиной магнитного поля близкой к нулю, куда, при определенных условиях, может прорываться мощными плазменными струями солнечный ветер (СВ) [12]. Открытые силовые линии магнитного поля Земли в этой области связаны с силовыми линиями межпланетного магнитного поля (ММП), что позволяет ускоренной плазме СВ врываться в магнитосферу, проникать в атмосферу и влиять на плотность плазмы ионосферы [13-15].

Магнитосфера и ионосфера Земли являются источниками электромагнитных колебаний и волн, многие из которых обнаруживаются в виде излучения за пределами области генерации, в частности, на поверхности Земли и на орбитальной Международной космической станции (МКС). Диапазон электромагнитного излучения (ЭМИ) магнитосферы и ионосферы перекрывает по частоте много порядков - от самых низких частот магнитогидродинамических (МГД) волн ($f \sim 5-10^{-3}$ Гц), волн в ВЧ-радиодиапазоне (f $\sim (1 \div 100) \cdot 10^6$ Гц), генерируемых в ионосферной плазме, вплоть до рентгеновского излучения энергичных электронов в верхней атмосфере (f $\sim 10^{18}$ Гц). Этот диапазон включает и радиоизлучение авроральной ионосферы $(f = 10^6 \div 10^{12} \, \Gamma_{\rm L})$. Потоки энергии, переноси¬мые ЭМИ в разных участках этого спектра, также отличаются на многие порядки величин [14, 16]. Прогресс в исследованиях околоземного космического пространства в последние несколько десятилетий был в значительной мере связан с открытием и изучением новых типов ЭМИ ионосферы и маг-нитосферы: рентгеновского, различных типов пульсаций магнитного поля и МГД волн, КНЧ- и ОНЧ-излучений, аврорального километрового радиоизлучения (АКР)

[14]. Участок шкалы ЭМИ ионосферы Земли в области частот $f = 10^7 \div 10^{10} \Gamma \mu$ (10 МГ $\mu - 10$ ГГ μ , верхняя часть КВ- и УКВ-диапазонов) остается в настоящее время практически не изученным, хотя о регистрации спорадических радиошумов в этом диапазоне во время геомагнитных возмущений сообщалось в работе [14]. Считается, что в этом интервале частот земная атмосфера и ионосфера прозрачны для радиоволн и в этом диапазоне реализуются практически все виды космической связи и навигации. Имеется также «окно прозрачности» в области спектра 8000-12 000 нм (или 8-12 мкм, ~100 ГГц). Коэффициент пропускания солнечного излучения в этом «окне» колеблется в среднем в пределах 60-70 %. На участках спектра 5200-8000 нм и более 15 000 нм солнечное излучение практически полностью поглощается водяным паром [17].

Таким образом, земная атмосфера почти полностью прозрачна для падающего извне излучения лишь в 2 сравнительно узких окнах: оптическом — в диапазоне длин волн, λ от 0,3 мкм (3000 · Å) до 1,5—2 мкм (область до 8 мкм состоит из ряда узких полос пропускания) и в радиодиапазоне — для волн длиной от 1 мм (КВЧ-излучение) до 15—30 м (ВЧ-излучение) [17, 18], т.е., в частотном диапазоне от 300 ГГц до \sim 10 МГц. Это означает, что в наземных условиях вода может служить индикатором космических излучений ЭМИ в резонансном диапазоне частот в соответствии с окнами прозрачности. Вместе с тем биоэффективность наземных естественных ЭМИ практически не изучена.

Можно предположить, что наземные эксперименты по выявлению индикаторных свойств воды целесообразно проводить в области каспа на арх. Шпицберген, где геофизическая среда наиболее приближена к космической. Кроме того, исследования на арх. Шпицберген позволяют выполнить и второе условие - возможность длительного сопряженного детектирования флуктуаций свойств воды и динамики психофизиологических показателей. Экспедиции на арх. Шпицберген создают возможность для изолированного проживания членов экспедиции в единообразных условиях и, при добровольном согласии, для проведения долговременной ежесуточной регистрации показателей их психофизиологического состояния. Третье условие становится выполнимым при комплексной регистрации функционального состояния организма, включающей оценку сердечно-сосудистой системы (ССС), время свертываемости крови (ВСК), психоэмоционального состояния.

Цель данного исследования состояла в оценке степени сопряженности между флуктуациями свойств воды, вариациями космофизических агентов и динамикой психофизиологических показателей состояния организма в условиях арх. Шпицберген для выявления свойств воды как

детектора воздействия внешней среды на организм человека.

Методика

Психофизиологическая оценка функционального состояния организма человека проводилась на группе добровольцев в соответствии с обязательным соблюдением этических норм, изложенных в Хельсинкской декларации 1975 г. с дополнениями 1983 г. Все обследуемые (43 человека), были ознакомлены с целью и условиями эксперимента и дали Информированное согласие на участие в исследованиях, проводимых в п. Баренцбург в период с 30 июля по 18 августа 2018 г. Психофизиологическое состояние участников исследования ежесуточно оценивалось на основе регистрации интегральных показателей состояния организма, оценки состояния ССС, ВСК, психоэмоционального состояния.

Оценка ССС включала показатели вариабельности сердечного ритма (ВСР), регистрируемые с применением приборно-аппаратурного комплекса «ОМЕГА-М» в положении лежа на основе 5-минутной записи R-R-интервалов. Гемодинамические показатели характеризовали артериальное давление, минутный объем крови (МОК), периферическое кровообращение (оцененное косвенным образом по температуре пальца с применением комплекса «Реакор»), ВСК на основании регистрации начала и конца образования фибриллярного сгустка [19].

Комплексная характеристика психофизиологического состояния была получена на основе регистрации кожно-гальванической реакции, показателей газоразрядной визуализации (ГРВ) свечения вблизи поверхности пальцев рук [19,20], опросников САН и Спилбергера – Ханина, цветового теста Люшера. ГРВ-регистрацию осуществляли с применением импульсного анализатора «ГРВ-компакт» ЕЮУИ 941 0204 00 00ТУ, серийный выпуск, ООО «Биотехпрогресс», сертификат соответствия NPOOC RU.МН05.Н00725, № 0490215. Полученные ГРВ-граммы обрабатывались с применением программы GDV Energy Field (http://www.ktispb.ru/en/ gdvsoft.htm), которая преобразует ГРВ-граммы в такие показатели свечения, как значения площади (S), коэффициента формы (Kf), энтропии (E) и симметрии (С), представленных в режимах регистрации ГРВ-грамм пальцев рук «без фильтра» (S_1; E_1 Kf_1; C_1) и «с фильтром» (S_2; E_2; Кf_2; C_2). На ГРВ-граммах «без фильтра» отражается интегральная характеристика состояния организма, определяемая вкладом центральной и автономной нервной системами (АНС). Применение фильтра позволяет исключить вклад АНС в характеристику показателей ГРВ-грамм, регистрируя базисные характеристики функционального состояния организма.

Свойства воды как индикатора интегрального воздействия физико-химических процессов в окружающей среде на воду и на организм человека оценивали на основе окислительно-восстановительного потенциала воды (ОВП, мВ) с применением ионометра И-160МИ. ОВП воды регистрировался комбинированным платиновым редокс-электродом ЭРП-105, который находился в стакане с дистиллированной водой и был подключен к ионометру И-160МИ, соединенным, в свою очередь, с компьютером через RS-232 интерфейс для осуществления непрерывного сбора данных. Используемый ионометр фиксировал колебания ОВП воды, связанные с изменением заряда ионов в растворах.

Результаты и обсуждение

Оценка степени сопряженности свойств воды, характеризуемых значениями ОВП воды с психофизиологическими показателями состояния организма и вариациями космофизических агентов показала, что флуктуации ОВП синхронны с динамикой показателей психофизиологического состояния испытуемых и с вариациями отдельных космофизических агентов (таблица).

В таблице можно видеть, что ОВП воды имеет значимые (р < 0,05) корреляции с интегральными показателями состояния организма, выраженными через индексы ГРВ: площади свечения (S 1, у.ед.), коэффициента энтропии (Е_1, у.ед.), коэффициента формы (Kf 1, у.ед.) в режимах регистрации ГРВ-грамм пальцев рук «без фильтра», что характеризует интегральное психофизиологическое состояние, определяемое эмоциональной компонентой; с показателями состояния ССС: длительностью кардиоинтервала (R-R, мс), относительным вкладом высокочастотной компоненты HF $(0,15-0,4 \Gamma \mu, mc^2)$; в общий спектр мощности (НГ, %) сердечного ритма, с минутным объемом крови (МОК, мл) – количеством крови, выбрасываемым сердцем в аорту или легочную артерию в течение 1 мин; с индексами психоэмоционального состояния: самочувствием (Сам), активностью (Акт), настроением (Наст), ситуативной тревожностью (СТ), выраженных в баллах, а также с психосоматическими показателями, оцененными по тесту Люшера – суммарным отклонением от аутогенной нормы (СО) и вегетативным коэффициентом (ВК), в баллах; с показателями системы кровообращения: с температурой пальца (t, °C), оцененной с применением комплекса «Реакор» и отражающей периферическое кровообращение, с ВСК (мин).

Знак коэффициентов корреляции демонстрирует физиологическое соответствие между величиной ОВП воды и функциональным состоянием организма. Так, показатели площади свечения пальцев (S_1) при регистрации ГРВ-грамм, вклада

Таблица

Коэффициенты корреляций между значениями ОВП воды, психофизиологическими показателями состояния организма* (S_1, E_1, Kf_1, R-R, HF (%), MOK, Сам, Акт, Наст, СТ, СО, ВК, Т, ВСК), космофизическими агентами *Pr t°, CB, Pr, >30 МэВ, R, f10,7

Индексы	M ± δ	ОВП	Pr t° K	СВ	Pr	R	f10,7
ОВП, мВ	187,06 ± 8,36	1,00	-0,55**	-0,60**	0,53**	-0,52**	0,90**
S_1	27750 ± 1058	0,52**	-0,44	-0,29	0,04	-0,61**	0,39
E_1	3,72 ± 0,05	-0,62**	0,41	0,41	-0,21	0,33	-0,39
Kf_1	16,98 ± 1,80	-0,67**	0,65**	0,35	-0,35	0,54**	-0,57**
R-R	900,7 ± 55,5	-0,58**	0,50**	0,17	-0,28	0,31	-0,46
HF (%)	23,53 ± 4,80	0,55**	-0,31	-0,17	0,35	-0,23	0,35
MOK	2506 ± 294	0,53**	-0,35	-0,29	0,32	-0,59**	0,30
Сам	5,46 ± 0,35	0,55**	-0,27	-0,57*	0,16	-0,57**	0,51**
Акт	5,07 ± 0,49	0,61**	-0,23	-0,50**	0,21	-0,56**	0,44
Наст	5,56 ± 0,42	0,62**	-0,60**	-0,52**	0,42	-0,61**	0,43
СТ	34,21 ± 3,90	-0,81**	0,29	0,51**	-0,32	0,59**	-0,66**
СО	12,26 ± 1,91	-0,75**	0,30	0,27	-0,49**	0,48	-0,57**
ВК	1,04 ± 0,13	0,49**	-0,20	-0,27	0,42	-0,52**	0,30
T	32,83 ± 1,76	-0,58**	0,32	0,43	-0,21	0,63**	-0,55**
ВСК	2,38 ± 0,32	0,62**	0,05	-0,30	-0,14	-0,37	0,68**

Примечание. * – пояснения к обозначению показателей приведены в тексте. Коэффициенты ранговых корреляций Спирмена, отмеченные ** значимы на уровне р < 0,05000.

высокочастотной компоненты в полный спектр мощности сердечного ритма (НЕ, %), минутный объем крови (МОК), самочувствие (САМ), активность (Акт), настроение (Наст), вегетативный коэффициент (ВК), время свертываемости крови (ВСК) возрастают при возрастании ОВП воды вне организма. Возрастание значений этих показателей, ассоциированных с возрастанием ОВП воды вне организма, свидетельствует об улучшении психофизиологического состояния, связанного с экономным режимом функционирования. Это следует из увеличения вклада (НЕ, %) парасимпатического звена АНС в регуляцию сердечного ритма при возрастании ОВП воды, из улучшения снабжения тканей кислородом за счет возрастания минутного выброса объема крови (МОК), а также в результате снижения вязкости крови (возрастание времени свертываемости крови, ВСК), что способствует более эффективному питанию тканей организма. Следствием улучшения физиологического состояния организма является возрастание активности (Акт), повышение настроения (Наст) и улучшение самочувствия (Сам). То есть возрастание ОВП воды вне организма, вероятно, отражает сопряженные изменения ОВП воды в организме, способствующие оптимизации функционального состояния посредством эффективного протекания окислительно-восстановительных процессов.

Экстраполируя смысловое содержание корреляции между физиологическими показателями и ОВП воды вне организма на связь тех же показателей с ОВП воды в организме, можно допустить, что свойства воды вне организма, детерминируемые внешним воздействием, сопряжены с изменением свойств воды в организме, подвергающемуся тому же воздействию. А это означает, что при одновременном воздействии физических агентов на воду вне организма и на организм, на основании изменений свойств воды вне организма можно судить о характере изменений в организме. Наглядное представление о степени сопряженности между флуктуациями ОВП воды и динамикой психофизиологических показателей можно получить на основании графиков, представленных на рис. 1 (А, Б).

На рис. 1, А можно видеть синхронность в динамике ежесуточных значений времени свертываемости крови (ВСК) и в ходе кривой среднесуточных значений показателей ОВП воды. Снижение значений ОВП воды сопровождается уменьшением времени образования фибриллярного сгустка (ВСК). То есть снижение ОВП воды является предиктором риска тромбообразования.

Отрицательные коэффициенты корреляции между значениями ОВП воды вне организма и такими показателями функционального состояния, как

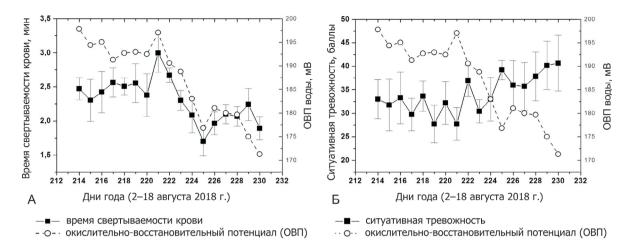


Рис. 1. Сопряженность флуктуаций ОВП воды вне организма с динамикой исследуемых показателей, (M \pm m): A – с временем свертываемости крови; Б – с ситуативной тревожностью

коэффициенты энтропии (E_1) и формы (Кf_1), при тестировании психофизиологического состояния с применением метода ГРВ, длительности кардио-интервала (R-R), ситуативной тревожности (СТ), суммарного отклонения от аутогенной нормы (СО), температуры пальца (см. табл.) свидетельствуют о том, что снижение значений ОВП воды вне организма сопряжено с ухудшением функционального состояния организма. На рис. 1, Б можно видеть, что снижение среднесуточных значений ОВП сопровождается возрастанием ситуативной тревожности (СТ) в группе обследуемых. Следовательно, значение показателя ОВП воды является также предиктором уровня психоэмоционального напряжения.

Внешним воздействием, модулирующим свойства воды вне организма, так же как и психофизиологическое состояние организма, в условиях проведения исследований на арх. Шпицберген [20], являются космофизические агенты, значимая связь (р < 0,05) которых с ОВП воды и с психофизиологическими показателями отражена в таблице. В таблице можно видеть, что ОВП воды вне организма имеет значимые отрицательные корреляции с температурой протонов в СВ (Pr, t° K), со скоростью СВ, с числами Вольфа (R), а положительные корреляции – с потоком протонов с энергиями >30 МэВ (Pr) и с потоком радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, что соответствует частотному диапазону f = 2800 МГц (f10,7).

Статистические характеристики отдельных показателей ММП, СВ, СА, индексов ГМА, приведенные в работе [19], свидетельствуют об очень низких значениях СА и ГМА в течение исследуемого периода времени. Так, медиана R-индекса, наиболее характерного показателя СА, равна 0, а среднестатистические значения R-индекса ($M \pm \delta$) за 20 дней, в течение которого проводили исследования, составляют 4,20 \pm 5,89. То же касается скорости СВ:

скорость СВ за исследуемый период времени, при средних значениях $382,10 \pm 52,45$ (км/с) и медиане 378,00 (км/с), ниже среднестатистической скорости (468 км/с), оцененной за два предыдущих цикла СА. Индексы Кр и Ар-индекс, характеризующие ГМА, также свидетельствуют о низких значениях ГМА с максимальным значением Ар-индекса 13 нТл, что соответствует слабовозмущенному геомагнитному полю (ГМП). Оценка степени сопряженности между индексами СА выявила, что в исследуемый период времени достаточно типичные положительные связи между R-индексом и f10,7-индексом отсутствуют (рис. 2). Выявлены отрицательные корреляции между f10,7-индексом и скоростью CB (r = -0,51, p < 0.05), Кр-индексом (r = -0.45, p < 0.05), Ариндексом (r = -0.52, p < 0.05). Такой характер связи между показателями СА свидетельствует, что, возможно, в период крайне низкой СА типичные корреляции между отдельными космофизическими агентами могут нарушаться. На рис. 2 можно видеть относительно независимый ход кривых индекса ГМА (Ap) и индексов CA (R – числа Вольфа и f10,7 – потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см).

Вместе с тем даже незначительные колебания плотности потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см детектируются водой, что проявляется в синхронных колебаниях ОВП воды вне организма и потока солнечного радиоизлучения (рис. 3). Коэффициент корреляции между значениями ОВП воды и плотностью потока солнечного радиоизлучения составляет r=0.9, при уровне p<0.05. Знаки связи и значения коэффициентов корреляции между ОВП воды вне организма и космофизическими агентами свидетельствуют о преимущественной модуляции свойств воды космофизическими агентами, ассоциированными с потоком солнечного радиоизлучения.

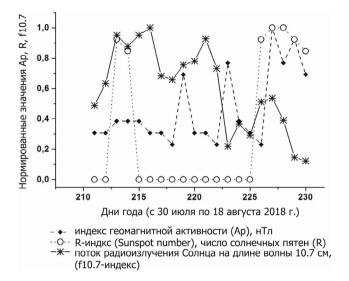
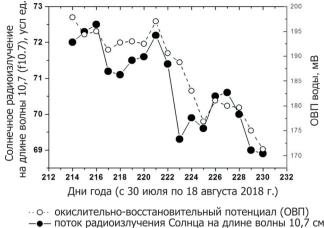


Рис. 2. Сопоставление временных рядов ежесуточных значений индекса геомагнитной активности Ap, R-индекса (чисел солнечных пятен), потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см



поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, (f10.7-индекс)

Рис. 3. Сопряженность флуктуаций ОВП воды вне организма с вариациями плотности потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см

Возможно, именно радиоизлучение Солнца, ассоциированное с СА, или ЭМИ, ассоциированные с солнечным радиоизлучением и генерируемые в магнитосфере и ионосфере Земли в результате сложных физических процессов взаимодействия СВ с магнитосферой Земли, является причиной изменения свойств воды, проявляющихся в колебаниях ОВП. Это же излучение могло бы воздействовать и на ОВП воды в организме, опосредованно модулируя его психофизиологическое состояние. Косвенным подтверждением такой возможности являются положительные и значимые (при уровне р < 0,05) коэффициенты корреляции между самочувствием (САМ), временем свертываемости крови (ВСК) и плотностью потоков солнечного радиоизлучения (f10,7): r = 0.51 и r = 0.68 соответственно (см. табл.). Отрицательные значимые (при уровне р < 0,05) коэффициенты корреляции, приведенные в таблице, между плотностью потоков солнечного радиоизлучения (f10,7), коэффициентом формы свечения (Kf_1), ситуативной тревожностью (СТ), суммарным отклонением от аутогенной нормы (СО), температурой пальца (Т) свидетельствуют, что возрастание плотности потоков солнечного радиоизлучения в пределах величин, характерных для периода исследований, благоприятно воздействует на состояние организма.

Изменение свойств воды вне организма под воздействием космофизических агентов, по всей видимости, отражает сходные процессы, идущие в водной среде внутри организма под воздействием тех же агентов. Подтверждением этому служит синхронность среднесуточных изменений ОВП воды вне организма, динамики среднесуточных показателей

свертываемости крови (ВСК) в организме и ежесуточных вариаций плотности радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см. В данной статье мы не обсуждаем, может ли солнечное радиоизлучение быть причиной колебаний ОВП воды и психофизиологических показателей, а лишь констатируем факт высокой степени сопряженности между этими показателями. Радиоизлучение Солнца на длине волны 10,7 см в условиях проведения эксперимента является маркером освещенности полярной ионосферы в течение полярного дня. В ионосфере, в условиях арх. Шпицберген, в результате постоянного проникновения солнечных протонов в полярный касп протекают сложные физические процессы, в том числе генерируются ЭМИ в различном диапазоне частот [13-16]. О возможной связи, между потоком солнечного радиоизлучения (f10,7) и генерацией ЭМИ, обусловленной проникновением протонов в полярный касп, свидетельствуют значимые коэффициенты корреляции между значениями показателя f10,7 и плотностью потока солнечных протонов с энергиями >10 и >30 МэВ (r = 0.49 и r = 0.53 соответственно, при уровне р < 0,05, ранговые корреляции по Спирмену). Поэтому, причиной вариаций ОВП воды и психофизиологических показателей состояния организма могли бы быть ЭМИ, генерируемые плазмой СВ или иными источниками.

Независимо от внешнего источника, модулирующего свойства воды (в частности, ОВП), вода может служить имитационной моделью для процессов, протекающих в организме. Отсюда следует, что изменения свойств воды под воздействием космофизических агентов вне организма могут служить предиктором каскада возможных физико-химических и биохимических событий внутри организма, порождаемых воздействием тех же агентов и влияющих на реологические свойства крови, изменение психоэмоционального и психофизиологического статуса организма.

Проведенные исследования показали, что вода представляет собой индикатор, позволяющий оценить космофизическое воздействие среды на организм человека, в том числе в условиях обитаемых космических станций. Кроме того, предварительные исследования по оценке эффектов воздействия геокосмических агентов на состояние организма выявили, что в условиях арх. Шпицберген внутрисистемные связи в организме и межсистемные связи с окружающей средой наиболее выражены. Поэтому изучение роли космофизических агентов для состояния организма в космических условиях, детектирование внешнего воздействия и прогнозирования эффектов посредством оценки изменения свойств воды наиболее целесообразно проводить в наземных условиях на арх. Шпицберген.

Выводы

- 1. Флуктуации свойств воды, выраженные через ОВП, в условиях арх. Шпицберген связаны с вариациями космофизических агентов. Установлены значимые коэффициенты корреляции ОВП с характеристиками солнечного ветра, с потоками солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см, также с психофизиологическими показателями состояния организма.
- 2. Возрастание значений ОВП воды сопряжено с улучшением общего состояния организма, что отражается в интегральных показателях психофизиологического состояния: в показателях ГРВ-грамм, в индексах, характеризующих вариабельность сердечного ритма, в минутном объеме крови, самочувствии, активности, настроении, значениях вегетативного коэффициента, времени свертываемости крови. И напротив, снижение значений ОВП воды свидетельствует об ухудшении состояния организма. Это означает, что значение ОВП воды может служить предиктором функционального состояния организма.
- 3. Проведенные исследования показали, что вода представляет собой индикатор, чувствительный к воздействию космофизических агентов; колебания значений ОВП воды отражаются в синхронных колебаниях функционального состояния биологических систем, что позволяет считать такой индикатор моделью, имитирующей состояние водной среды в организме. Предлагается использовать индикаторные свойства воды для изучения интегрального воздействия среды на организм человека в обитаемых космических аппаратах.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «Биотехпрогресс» Роману Рагимовичу Юсубову и Елене Евгеньевне Яновской за предоставление камеры ГРВ-контакт с обновленным программным обеспечением для работы на арх. Шпицберген и за возможности открытого обсуждения полученных результатов.

Авторы также признательны всем добровольцам, принимавшим участие в исследованиях, коллегам из Полярного геофизического института РАН: завсектором космических лучей, канд. физ.-матем. наук Ю.В. Балабину и научному сотруднику, канд. физ.-матем. наук Б.Б. Гвоздевскому за участие в исследованиях и предоставление возможности использования геофизических данных.

Список литературы

1. *Цетлин В.В.* Исследование реакции воды на вариации факторов окружающего пространства // Авиакосм. и экол. мед. 2010. Т. 44. № 6. С. 26–30.

Tsetlin V.V. Investigation of the reaction of water to variations of environmental factors // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2010. V. 44. № 6. P. 26–30.

2. Цетлин В.В., Файнштейн Г.С. О влиянии космофизических, геофизических и радиационных факторов на электрофизические и биологические свойства воды. Метафизика. М., 2012. \mathbb{N}^9 2 (4). С. 81–99.

Tsetlin V.V., Fainshtein G.S. On the influence of cosmophysical, geophysical and radiation factors on the electrophysical and biological properties of water. Metaphysics. Moscow, 2012. Nº 2 (4) . P. 81–99.

3. Винниченко М.Б., Н.К. Белишева, В.К. Жиров. Модуляция свойств воды вариациями космических лучей // ДАН. Науки о Земле. 2009. Т. 429. № 6. С. 816–820.

Vinnichenko M.B., Belisheva N.K., Zhirov V.K. Modulation of water properties by variations of cosmic rays // DAN. Nauki o Zemle. 2009. V. 429. № 6. P. 816–820.

4. *Мицуков А.С., Муравьев С.В., Белишева Н.К.* Отражение динамики геофизической среды в психофизиологическом состоянии человека и в свойствах воды // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2016. № 2 (23). Ч. 3. С. 106—109.

Mitsukov A.S., Muravyov S.V., Belisheva N.K. Reflection of the dynamics of the geophysical environment in the psychophysiological state of a person and in the properties of water // Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU). 2016. № 2 (23). P. 3. P. 106–109

5. Цетлин В.В., Белишева Н.К., Муравьев В.С., Мартынова А.А. и др. Сопряженность динамики свойств воды с психофизиологическим состоянием человека и вариациями космофизических агентов — основа для детекции условий полета посредством сенсорных свойств воды // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 5. С. 254—256.

Tsetlin V.V., Belisheva N.K., Muravyov V.S. et al. The combination of the dynamics of water properties with

the psychophysiological state of a person and variations of cosmophysical agents is the basis for detecting flight conditions by means of the sensory properties of water // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.. 2016. V. 50. \mathbb{N}° 5. P. 254–256.

6. *Мышкин В.Ф., Власов В.А., Хан В.А. и др.* Структура и свойства воды, облученной СВЧ излучением // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 81 (07). URL: http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/51.pdf.

Myshkin V.F., Vlasov V.A., Khan V.A. et al. The structure and properties of water irradiated by microwave radiation // Nauchny zhurnal KubGAU. 2012. № 81 (07). URL: http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/51.pdf.

- 7. Синицин Н.И., Петросян В.И., Елкин В.А. и др. Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 1. С. 47–51. Sinitsin N.I., Petrosyan V.I., Elkin V.A. et al. Biomedical Radio Electronics. 1998. № 1. Р. 47–51.
- 8. *Бецкий О.В.* СПЕ-эффект, прохождение КВЧ-излучения через преграды, взаимодействие волн КВЧ диапазона и организма человека // Радио. 1999. № 10. С. 47–48.

Betsky O.V. SPE-effect, the passage of EHF-radiation through obstacles, the interaction of waves of the EHF range and the human body // Radio. 1999. Nº 10. P. 47–48.

9. *Черепнев И.А., Полянова Н.В.* Взаимодействие макромолекул с внешним электромагнитным полем // Системы обработки информации. 2007. Вып. 3 (61). С. 139–142.

Cherepnev I.A., Polyanova N.V. The interaction of macromolecules with external electromagnetic field // Systemy obrabotki informatsii. 2007. Is. 3 (61). P. 139–142.

10. *Петросян В.И.* Резонансное излучение воды в радиодиапазоне // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 23. С. 29–33.

Petrosyan V.I. Resonant radiation of water in the radio range // Pis'ma v ZhTF. 2005. T. 31. Is. 23. P. 29–33.

- 11. *Tsyganenko N.A., Russell C.T.* Magnetic signatures of the distant polar cusps: Observations by Polar and quantitative modelling // JGR. 1999. V. 104. № 24. P. 939.
- 12. Савин С.П. Магнитный щит Земли: плазменные бреши. URL: http://www.kosmofizika.ru/popular/savin.htm.

Savin S.P. Magnetic shield of the Earth: plasma gaps. URL: http://www.kosmofizika.ru/popular/savin.htm.

13. *Голиков Ю.В. и др.* О природе электромагнитного излучения низкой частоты в полярной шапке // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22. Вып. 1. С. 3–7.

Golikov Yu.V. et al. On the nature of low-frequency electromagnetic radiation in the polar cap // Pis'ma v ZhETF. 1975. V. 22. Is. 1. P. 3–7.

14. Клименко В.В. УКВ радиоизлучение полярной ионосферы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 2002.

Klimenko V.V. VHF radio emission of the polar ionosphere: Dissertatsiya ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Irkutsk, 2002.

15. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Ионосферная плазма. 2008. Т. 1–3. Разд. II. Гл. 1. С. 103–163.

Encyclopedia of low-temperature plasma. Ionospheric plasma. 2008. V. 1–3. Section II. Ch. 1. P. 103–163.

16. *Будько Н., Зайцев А., Карпачев А. и др.* Космическая среда вокруг нас / А.Н. Зайцев, ред. Троицк, 2006.

Budko N., Zaytsev A., Karpachev A. et al. The space environment around us / A.N. Zaytsev, ed. Troitsk, 2006.

- 17. URL: http://www.astronet.ru/db/msg/1188575.
- 18. Avakyan S.V. Microwave emission of Rydberg states as a new factor of solar-biosphere relations // Proc. of 5th Int. conf. «Problems of Geocosmos». St.-Petersburg, 2004. P. 4.
- 19. Белишева Н. К., Мартынова А. А., Пряничников С. В. и др. Связь параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра в области полярного каспа с психофизиологическим состоянием жителей арх. Шпицберген // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 4. С. 5–24.

Belisheva N.K., Martynova A.A., Pryanichnikov S.V. et al. Connection between the parameters of the interplanetary magnetic field and the solar wind in the region of the polar cusp with the psychophysiological state of the inhabitants of arch. Svalbard // Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. - 2018. No. 4. - S. 5-24

20. Ушаков И.Б., Малащук Л.С., Сенькин В.В. и др. ГРВ-графия — комплементарный диагностический метод оценки функционального состояния летчиков высокоманевренных самолетов // Матер. науч.-практ. конф. «Системный подход к вопросам анализа и управления биологическими объектами». М.; СПб., 2000. С. 10–11.

Ushakov I.B., Malashchuk L.S., Senkin V.V. et al. GDV-graphy – a complementary diagnostic method for assessing the functional state of pilots of highly maneuverable aircraft // Proc. of scientific and practical conf. «A systematic approach to the analysis and management of biological objects». Moscow; St.-Petersburg, 2000. P. 10–11.

Поступила 21.10.2019

WATER AS AN INDICATOR OF COSMIC PHYSICAL EFFECTS ON THE HUMAN ORGANISM IN THE CONDITIONS OF THE SVALBARD ARCHIPELAGO

Belisheva N.K.¹, Tsetlin V.V.², Martynova A.A.¹, Solovievskaya N.L.¹, Zavadskaya T.S.¹, Pryanichnikov S.S.¹, Megorsky V.V.¹

¹Research Centre for Human Adaptation in the Arctic of Federal Research Center - Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity

²Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Association between fluctuations in water properties, variations of cosmospace agents and dynamics of human psychophysiological parameters was explored in order to

assess water as a potential indicator of external factors affecting the human organism. Monitoring of 43 volunteers in township Barentzburg (Svalbard archipelago) performed from July 30 till August 18, 2018 consisted of daily registration of integral body functional parameters using a gas-discharge lamp, cardiovascular data recording, blood coagulation analysis, and mood and behavior observations. Water as an indicator of integral effects of physicochemical processes in the ambient environment was assessed by the redox potential (RP, mV) using ionometer I-160MI. It was demonstrated that water RP fluctuations in the Svalbard archipelago region were related to solar wind characteristics and solar radiation fluxes at 10.7 cm, and human psychophysiological parameters.

Therefore, RP of extra-body water might be predictive of the body functioning. The investigations showed that water represents a detector sensitive to the cosmophysical agents. Since water RP fluctuations are synchronous with fluctuations in bio-systems functioning we may assume that this detector can be used as a model imitating the liquid medium in organism for studies of the integral effects of spaceflight factors.

Key words: water, redox potential, cosmophysical agents, organism.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2020. V. 54. № 2. P. 96–104.

НЕКРОЛОГ



АДИЛЯ РАВГАТОВНА КОТОВСКАЯ 22.10.1927 — 29.03.2020

29 марта 2020 года не стало А.Р. Котовской, одной из основоположников отечественной космической биологии и медицины, крупнейшего специалиста в области гравитационной физиологии и медицины, доктора медицинских наук, профессора, действительного члена Международной академии астронавтики.

Более 60 лет своей жизни А.Р. Котовская посвятила научной и практической работе в авиационной и космической медицине. Она принадлежала к поколению «первопроходцев», искавших и определявших никому до той поры неизвестные пути и направления развития новой науки — космической медицины.

А.Р. Котовская являлась непосредственным участником научных исследований с животными при полетах в космос, подготовки первого полета животного (собаки Лайка) на 2-м искусственном спутнике Земли, участвовала в отборе и подготовке первого космонавта – Ю.А. Гагарина, а также ряда последующих экипажей космических кораблей.

С начала космической эры нашей страны и до последних дней своей долгой и плодотворной жизни А.Р. Котовская руководила рядом крупных научных программ, направленных на исследование возможностей организма человека при действии основных факторов космического полета. Она, в числе других ученых, разрабатывала основные принципы отбора и подготовки космонавтов к действию перегрузок космического полета. Впервые под ее руководством была определена оптимальная поза человека в кресле космического корабля, которая до сих пор используется на космическом корабле «Союз». Впервые было обосновано и внедрено использование специальных противоперегрузочных костюмов, один из которых – «Кентавр» используется российскими космонавтами на участке спуска на Землю и в настоящее время.

На протяжении 40 лет А.Р. Котовская осуществляла научное руководство российско-французских научных проектов: PVH (1982), «Арагац» (1988), «Антарес» (1992), «Альтаир» (1993), «Кассиопея» (1996), «Пегас» (1998), «Персей» (1999), «Андромеда» (2001), «Кардиомед» (2000–2020).

Под руководством А.Р. Котовской впервые в реальных космических полетах различной длительности на орбитальных станция «Салют» и «Мир» выполнены с помощью ультразвуковых методов комплексные исследования механизмов гемодинамических расстройств у космонавтов, позволяющие прогнозировать степень изменений ортостатической устойчивости космонавтов во время полета.

А.Р. Котовская является соавтором монографии «Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести» (1996), соавтором крупных глав в совместных советско-американском (1975) и российско-американском (1997) изданиях по космической биологии и медицине. Она автор более 400 научных статей и книги воспоминаний «Непрошедшее время» (2012).

Под ее руководством защищены 8 кандидатских и 1 докторская диссертации.

За весомый вклад в развитие отечественной и мировой космической медицины А.Р. Котовская награждена правительственными наградами: двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Дружбы, Национальным орденом Французской республики — «За заслуги» (степень Офицер). А.Р. Котовская награждена дипломом именной премии РАМН имени В.В. Парина в области физиологии и патологии кровообращения (2003).

Нам неслыханно повезло работать с человеком, лично знавшим С.П. Королева, М.В. Келдыша, М.К. Тихонравова, Ю.А. Гагарина, являвшимся соратником и другом О.Г. Газенко.

Целеустремленность, ответственность, дальновидность Адили Равгатовны при планировании экспериментов, проведение научных исследований были настоящей школой для молодых научных сотрудников, работавших под ее руководством.

Все, кто знал Адилю Равгатовну и имел честь работать с ней, всегда будут вспоминать о ней с почтением и благодарностью.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет с юбилейными датами сотрудников ГНЦ РФ – ИМБП РАН:

Квасовец Сергея Валентиновича
Кирееву Любовь Валерьевну
Мурашко Людмилу Михайловну
Николаева Сергея Олеговича
Семенкову Татьяну Васильевну
Семенцова Вадима Николаевича
Соловьеву Зою Олеговну
Филатову Ларису Михайловну
Чельную Наталью Александровну
Шафиркина Александра Венециановича
Эсаулова Петра Всеволодовича

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!