АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА
AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

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

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

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

2022 Т. 56 № 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, 2022
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2022

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

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

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

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

Сдано в набор 05.04.2022
Подписано в печать 19.04.2022
Формат 60 × 84 1/8
Гарнитура Tahoma
Печать офсетная
Усл. печ. л. 12,09
Тираж 170 экз
Заказ № 69

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

Содержание

Contents

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Рюмин О.О., Войтенко А.М. Организаторские профессионально важные качества командира экипажа межпланетной экспедиции: структура, оценка, развитие **5**

Ryumin O.O., Voitenko A.M. Managerial professionally important qualities of the interplanetary crew commander: structure, assessment, development

Власова Д.Д., Садова А.А., Галина В.С., Германов Н.С., Рыкова М.П., Антропова Е.Н., Кутько О.В., Шульгина С.М., Орлова К.Д., Шмаров В.А., Лысенко Е.А., Пономарев С.А. Влияние 21-суточной «сухой» иммерсии на экспрессию генов врожденного иммунитета, ассоциированных с сигнальными путями Toll-подобных рецепторов **11**

Vlasova D.D., Sadova A.A., Galina V.S., Guermanov N.S., Rykova M.P., Antropova E.N., Kutko O.V., Shulguina S.M., Orlova K.D., Shmarov V.A., Lysenko E.A., Ponomarev S.A. Effect of 21-day dry immesrion on expression of inborn immunity genes associated with the Toll-like receptors' signaling pathways

Вильчинская Н.А., Рожков С.В., Комарова М.Ю., Дмитриева Р.И., Шенкман Б.С. Влияние моделируемой гравитационной разгрузки на состояние сателлитных клеток камбаловидной мышцы **20**

Vilchinskaya N.A., Rozhkov S.V., Komarova M.Yu., Dmitrieva R.I., Shenkman B.S. Effect of modeled gravitational unloading on soleus muscle satellite cells

Лебедева-Георгиевская К.Б., Перевезенцев А.А., Кузнецова О.С., Кудрин В.С., Митрофанова О.В., Масанова А.А., Штемберг А.С. Молекулярные, нейрофизиологические и интегративные эффекты комбинированного воздействия антиортостатического вывешивания и ионизирующих излучений у крыс **30**

Lebedeva-Gueorgievskaya K.B., Perevezentsev A.A., Kuznetsova O.S., Kudrin V.S., Mitrofanova O.V., Masanova A.A., Shtemberg A.S. Molecular, neurophysiological and integrative effects of the combined exposure to tail-suspension and ionizing radiation in rats

Зацепилин А.В., Хоменко М.Н., Филатов В.Н., Чистов С.Д., Симухин В.В., Кисляков Ю.Ю. Психофизиологические особенности выполнения полетов в режиме сверхманевренности **39**

Zatsepilin A.V., Khomenko M.N., Filatov V.N., Chistov S.D., Simukhin V.V., Kislyakov Yu.Yu. Psychophysiological aspects of executing supermaneuver flights

Писаренко Ю.Э., Чулаевский А.О., Рыбникова М.Н. Современный подход к совершенствованию системы профессионального психологического отбора военных летчиков-испытателей **46**

Pisarenko Yu.E., Chulaevsky A.O., Rybnikova M.N. Up-t0-date approach to improvement of the system of professional psychological selection of military test-pilots

Иванов И.В., Миланин А.А., Желтый О.П., Стась Ю.В. Эмоционально-стрессовая медико-психологическая коррекция с гипервентиляционной нагрузкой: оценка клинических эффектов и показаний к проведению у летного состава и комбатантов **54**

Ivanov I.V., Milanin A.A., Zhelty O.P., Stas Yu.V. Medico-psychological correction of emotional stress with hyperventilation: assessment of clinical effects and indications for application to pilots and combatants

Филатов В.Н., Шишов А.А., Дворников М.В., Шишкин А.Н., Рыжов Д.И., Никифоров Д.А. Барокамерные «подъемы» как метод психофизиологической подготовки лиц опасных профессий, выполняющих задачи в условиях выраженных степеней гипоксии **64**

Filatov V.N., Shishov A.A., Dvornikov M.V., Shishkin A.N., Ryzhov D.I., Nikiforov D.A. Hypobaric chamber «ascents» as a method of psychophysiological training for risky occupations associated with exposure to high-level hypoxia

Бурмистров В.И., Иванов И.В., Маткевич Е.И., Праскурничий Е.А. Оценка значимости факторов аварийности беспилотных летательных аппаратов **73**

Burmistrov V.I., Ivanov I.V., Matkevich E.I., Praskurnichiy E.A. Analysis of the significance of factors contributing to the pilotless vehicle accident rate

Солдатов С.К., Драган С.П., Богомолов А.В., Пирожков М.В., Скрябин С.Ю., Городенко О.В., Синельников И.А. Гигиенические аспекты шума, генерируемого аэродромным оборудованием **85**

Soldatov S.K., Dragan S.P., Bogomolov A.V., Pirozhkov M.V., Skryabin S.Yu., Gorodenko O.V., Sinelnikov I.A. Hygienic aspects of the noise generated by aerodrome facilities

Методики

Methods

Матюшев Т.В., Дворников М.В., Рыженков С.П., Максимова И.Д., Рыбина А.С., Малышев А.Д., Носков Р.Г. Теоретическая оценка переносимости декомпрессии человеком в разгерметизированной гермокабине **90**

Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Ryzhenkov S.P., Maksimova I.D., Rybina A.S., Malyshev A.D., Noskov R.G. Theoretical evaluation of the human decompression tolerance inside a depresserized hermetic cabin

Хроника и информация

Chronicle and Information

Баранов В.М., Белаковский М.С. К 100-летию со дня рождения Генина Абрама Моисеевича **98**

Baranov V.M., Belakovsky M.S. 100th birthday of Genin Abram Moiseevich

Памяти Стрельцова Владимира Владимировича – одного из основоположников авиационной медицины **103**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 61:613.693

ОРГАНИЗАТОРСКИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫЕ КАЧЕСТВА КОМАНДИРА ЭКИПАЖА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ: СТРУКТУРА, ОЦЕНКА, РАЗВИТИЕ

Рюмин О.О.[1], Войтенко А.М.[2]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

E-mail: ryumin@imbp.ru

В статье рассматриваются особенности отбора кандидатов на должность командира межпланетной экспедиции. Определяется важность обязательного учета организаторских профессионально важных качеств (ПВК) как ключевых элементов, обеспечивающих эффективность его целевой деятельности по организации и управлению экипажем. Описывается структура организаторских качеств и предлагается методика их оценки в процессе отбора. Представлена возможность использования данной методики на примере командного звена летного состава ВВС.

Важное значение в развитии организаторских ПВК и обеспечении высокой надежности профессиональной деятельности командира межпланетной экспедиции имеет психологическая подготовка. Она включает общую (изучение основных положений дисциплин, без знаний которых невозможно формирование и развитие организаторских ПВК), специальную (содержащую варианты решения групповых задач и принятия командиром управленческих решений) и целевую (отработка элементов конкретной программы полета в составе экипажа) подготовки.

Ключевые слова: командир межпланетной экспедиции, отбор, организаторские профессионально важные качества, психологическая подготовка.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 5–10.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-5-10

В настоящее время пилотируемая космонавтика осуществляет планомерный переход от чисто теоретических программ исследований по организации и выполнению космических полетов вне низких орбит к этапу практической реализации подобных миссий. В результате анализа данных, представленных в научных работах и полученных в модельных аналоговых экспериментах [1, 2], а также изучения результатов орбитальных пилотируемых полетов различных по длительности, задачам и техническим средствам были определены риски, способные оказать негативное влияние на успешное выполнение длительных пилотируемых межпланетных экспедиций. Среди основных факторов, отличающих перспективные межпланетные миссии от выполняемых в настоящее время экспедиций на низкой околоземной орбите и связанных с ними риском возникновения неблагоприятных изменений поведения у членов экипажа, ведущим является автономность полета. Высокий уровень автономности экипажа связан с удаленностью космического аппарата от Земли и подразумевает явные ограничения или невозможность в режиме реального времени осуществлять коммуникации с Центром управления полетом (ЦУП), перманентного обмена необходимой информацией, консультаций, реализации логистических операций (допоставки воды, пищи, оборудования и т.п.), проведения мероприятий психологической поддержки, а также выполнения действий по экстренному возвращению космонавтов на Землю в случае необходимости [3].

Изучение устойчивости позитивного межличностного взаимодействия членов международных экипажей длительных (до года) орбитальных экспедиций показало явное смещение вектора напряжения и отрицательных эмоций, возникающих между членами экипажа, на персонал управления полетами (главные операторы, сменные руководители полета, постановщики экспериментов и др.). Это порождает реальный риск возникновения негативных поведенческих реакций и проблем с коллективным безопасным поведением экипажей длительных автономных экспедиций вне низких орбит. В этом случае развитие выраженного нервно-эмоционального напряжения в процессе полета не будет иметь внешнего «выхода» и как следствие приводить к развитию межличностных конфликтных ситуаций, вплоть до разрыва взаимоотношений космонавтов «внутри» экипажа. Роль командира была связана с групповой сплоченностью членов экипажа [4]. На борту межпланетного космического транспортного корабля выполнение программы полета требует постоянной координации совместных действий каждого члена экипажа. В связи с этим вопросы

обеспечения успешной совместной деятельности, коллективного существования и сплоченности приобретают особую значимость. Сплоченность характеризуется единством действий, поведения, понимания и оценок происходящих событий, уровнем согласия, взаимопомощи и поддержки коллег по экипажу [5]. Неумелое руководство со стороны командира может привести к излишнему напряжению, конфликтам и даже «развалу» экипажа. Ведущим и ключевым фактором, формирующим сплоченность автономного экипажа, является его командир – человек с ярко выраженным характером лидера, высоким уровнем профессиональной подготовки и надежности.

Профессиональная надежность командира экипажа межпланетной экспедиции отражает его способность без ущерба для здоровья выполнять свои профессиональные задачи в любых условиях с заданным качеством в течение нормативного времени. Ведущими ее компонентами являются:

– необходимый уровень профессиональной подготовленности;
– необходимое профессиональное здоровье;
– совершенные профессионально важные качества (ПВК).

Профессиональная подготовленность командира должна обеспечивать выполнение экипажем задач экспедиции на всех этапах в штатных и нештатных ситуациях. Ее необходимый уровень достигается предварительной оценкой способностей и качеств в процессе отбора, а также последующей реализации всей программы подготовки, включающей теоретические и практические вопросы деятельности командира по выполнению своих обязанностей и руководству экспедицией во время всего полета. Известная в настоящее время структура ПВК летчиков представлена личностными, интеллектуальными, операторскими, физическими качествами и может рассматриваться как базовая для всех специалистов операторского профиля. Однако специфика профессиональной деятельности командиров (руководителей коллективов) предполагает совершенно особую значимость их организаторских качеств. Как показывают результаты проведенного опроса опытных летчиков – руководителей различных авиационных подразделений ВВС РФ, именно организаторские качества определяют успешность их деятельности. Герой России, летчик-космонавт РФ, командир 2-й экспедиции МКС Юрий Усачев определил ряд качеств, отсутствие которых может затруднить человеку эффективное выполнение обязанностей командира в полете [6]. К ним были отнесены:

– опыт длительного космического полета;
– опыт административно-командной работы (желательно как для гражданских лиц, так и военных);
– знания по психологии как личности, так и малых групп;
– знания культуры стран членов экипажа;
– уверенное владение английским языком;
– авторитет среди членов экипажа и безусловное принятие тебя как лидера;
– умение управлять деятельностью экипажа, умение грамотно поставить задачу и проконтролировать ее обязательное исполнение;
– знание психологических «портретов» членов экипажа и умение прогнозировать их поведение в длительном полете;
– готовность в любой момент действовать: для обеспечения безопасности экипажа (вплоть до покидания комплекса) и живучести станции;
– знание технических (общие и текущие) возможностей станции для обеспечения жизнедеятельности экипажа (все резервы);
– готовность обеспечивать постоянный и полный контроль ситуации на борту;
– обладание интуицией (по возможности) и умением ею пользоваться;
– соблюдение спокойствия в любой обстановке и сдержанность в суждениях;
– знание сильных и слабых сторон (физиологических, психологических, человеческих, профессиональных и пр.) членов экипажа;
– владение возможно полной информацией о членах экипажа (семья, история, хобби и т.д.);
– знание организационной наземной инфраструктуры партнеров-агентств, механизма работы и принятия решения (ЦУП, администрация);
– способность адекватной и критичной самооценки, готовность изменить свое мнение или принятое решение.

Организаторские качества человека обеспечивают эффективность целевой деятельности и актуализируются в развитии группы как коллектива, воспитании подчиненных, их объединении и сплочении [7]. К организаторским качествам традиционно относятся психологическая избирательность, практически психологическая направленность, психологический такт, общественная энергичность, требовательность организатора, критичность организатора, склонность к организаторской деятельности. Применительно к деятельности командира межпланетной экспедиции эти структурные элементы организаторских ПВК могут иметь следующее смысловое содержание.

Психологическая избирательность – способность и готовность командира наиболее полно и глубоко отражать межличностные отношения и психологические особенности группы/экипажа в целом, точно понимать и прогнозировать безопасное коллективное поведение космонавтов в процессе всего полета.

Практически психологическая направленность проявляется в распределении функций и

установлении взаимосвязей между членами экипажа. Внешними признаками данного организаторского качества является быстрая и адекватная ориентация при принятии командиром управленческих решений и способность оперативно активизировать необходимые мотивы подчиненных космонавтов.

Психологический такт характеризуется способностью соблюдать чувство меры во взаимоотношениях с членами экипажа, адекватное реагирование на любые проявления их психологических особенностей. Данное качество наиболее значимо проявляется в нештатных и аварийных ситуациях, а также при возможных аффективных состояниях лиц, находящихся на борту пилотируемого космического корабля.

Общественная энергичность проявляется в виде способности командира как лидера заряжать своей энергией всех членов экспедиции, формировать у них стенические чувства и активизировать волевые усилия. Данное качество проявляется в уверенности принятия решений, активном поведении и своевременных профессиональных действиях.

Требовательность командира к членам экипажа характеризует его готовность и способность в постановке оперативных задач в соответствии с реальной ситуацией и необходимостью обеспечения безусловного их исполнения.

Критичность командира экипажа по отношению к его членам характеризуется способностью обнаружить и довести до них все значимые для реализации организаторской деятельности отклонения от нормативных условий выполнения полетных задач. Предполагает самостоятельность, логичность, аргументированность и прямоту критических высказываний, вариативность их форм и адекватность психологическим особенностям и состоянию членов экипажа.

Склонность к организаторской деятельности выражается в психологической готовности и внутренней потребности человека в осуществлении данного вида деятельности, приносящей удовлетворенность в процессе ее выполнения.

Следует отметить, что при всей неравнозначности перечисленных качеств в их структуре первенство принадлежит *организаторскому предвидению* командира, которое фактически объединяет психологическую избирательность, практически психологическую направленность и психологический такт. Оно является основой для *эмоционально-волевого воздействия*, включающего в себя общественную энергичность, требовательность, критичность командира экипажа и служит процессуальной характеристикой организаторских качеств. Очевидно, что организаторские ПВК опосредуются требованиями, предъявляемыми самой деятельностью командира и соответствуют специфическим чертам личности конкретного человека.

В настоящее время отбор кандидатов на командные должности в военной авиации традиционно осуществляется по наличию классной квалификации, оценкам по технике пилотирования, навигации, уровню наземной подготовки и знанию авиационной техники, а также административному решению, выносимому с учетом характеристик лишь некоторых свойств личности летчика без учета результатов выполнения психологических методик. Аналогичные подходы существуют и в практике назначения командиров космических экипажей. Это, на наш взгляд, не вполне правильно, так как среди всего контингента космонавтов лишь отдельные лица имеют определенные личностные свойства, представляющие реальную основу для формирования у них в процессе подготовки особых функциональных систем психики, обеспечивающих актуализацию организаторских способностей и являющихся предпосылкой успешного выполнения обязанностей командира.

Необходимо согласиться с мнением специалистов [8] и отметить неспособность при использовании традиционных психологических способов изучения свойств личности однозначно установить структуру организаторских способностей и степень их развития у человека. Это объясняется, во-первых, отсутствием конкретности трактовок в отношении самих организаторских качеств и, во-вторых, невозможностью их точной количественной оценки. Из существующих сейчас способов, на наш взгляд, практический интерес в рассматриваемом направлении представляет модифицированная методика Л.И. Уманского [9], которая позволяет установить структуру и построить профили организаторских качеств командиров. Надежность получаемых в этом случае результатов обеспечивается привлечением независимых экспертов, являющихся высококлассными специалистами. В их состав при определении кандидатов на «командирское кресло» в межпланетной экспедиции целесообразно включать:

– командира отряда космонавтов и старших групп космонавтов;
– космонавтов, имеющих значительный опыт работы в качестве командира экспедиции;
– наиболее опытных инструкторов и методистов, осуществляющих разностороннюю профессиональную подготовку членов экипажей;
– психологов сопровождения космонавтов;
– разработчиков программ конкретного полета;
– ответственных специалистов из ЦУП.

В ходе исследований по методике Л.И. Уманского с участием военных летчиков 1-го и 2-го классов авиационных частей и слушателей Военно-воздушной академии нами были получены нормативно-оценочные шкалы их организаторских профессионально важных качеств (таблица).

Таблица

Нормативно-оценочные шкалы организаторских ПВК летчиков, баллы, M ± m

Группы организаторских ПВК	Группы летчиков			
	1-й курс	2-й курс	3-й курс	Воинская часть
Психологическая избирательность	До 3,14	3,15–3,63	3,64–3,89	Свыше 3,90
Психологическая направленность	До 3,25	3,26–3,77	3,78–3,80	Свыше 3,81
Психологический такт	До 3,16	3,17–3,98	3,99–4,10	Свыше 4,11
Общественная энергичность	До 3,30	3,31–3,66	3,67–3,74	Свыше 3,75
Требовательность командира	До 3,34	3,35–3,74	3,75–3,92	Свыше 3,93
Критичность командира	До 3,21	3,22–3,67	3,68–3,78	Свыше 3,79
Склонность к организаторской деятельности	До 3,18	3,19–3,49	3,50–3,68	Свыше 3,69

Наличие нормативно-оценочной шкалы, разработанной для объективизации процесса назначения командира при формировании экипажей межпланетных миссий, позволит сделать его более наглядным и объяснимым и устранит дополнительный негативный элемент как причину для развития конфликтных ситуаций среди группы кандидатов на должность.

Установленные профили организаторских ПВК командиров-летчиков 1-го и 2-го класса (по мнению экспертов) дают возможность определить пороговые уровни по каждому качеству. Уровень развития организаторских качеств в среднем в диапазоне до 3,28 ± 0,06 балла считается недостаточным, от 3,28 ± 0,06 до 3,89 ± 0,12 балла – умеренным, от 3,89 ± 0,12 до 4,05 ± 0,25 – достаточным и свыше 4,05 ± 0,25 – высоким. Кроме того, существует ситуационная зависимость уровня проявления организаторских качеств. Командиры-слушатели 1-го и 2-го курсов, временно отчужденные от активного руководства экипажем или подразделением, имеют более низкий уровень организаторских ПВК, чем командиры экипажей в строевых частях. К окончанию академии слушатели актуализируют свои организаторские способности, по-видимому, за счет формирования психологической готовности к предстоящей деятельности. Их целенаправленность и высокая мотивация на организаторскую работу даже превышают уровень командиров экипажей строевых частей.

Целесообразно выделить 3 ситуации при реализации организаторских качеств: отчуждения, готовности и непосредственного исполнения служебных обязанностей.

Было бы большой ошибкой полагать, что проблема наличия у командира необходимых ПВК полностью решается в процессе прохождения профессионального психологического отбора кандидатов в космонавты. На данном этапе определяется только исходный уровень этих качеств у человека, способности, которые в дальнейшем развиваются в процессе подготовки и на протяжении всей профессиональной деятельности космонавта.

Важное значение в развитии организаторских ПВК и обеспечении высокой надежности профессиональной деятельности командира межпланетной экспедиции имеет психологическая подготовка. Данный вид подготовки представляет собой комплекс мероприятий по формированию у командира экипажа нервно-психической устойчивости и соответствующих эмоционально-волевых качеств, необходимых для выполнения программы миссии, позволяющих укрепить психику, приобрести умение руководить экипажем в различных условиях, включая нештатные ситуации, а также активно принимать самостоятельные (подчас непопулярные) управленческие решения. Сущность такой подготовки должна проявляться в заблаговременном создании у командира экипажа необходимого психологического ресурса, который позволил бы ему управлять экипажем в полете, своевременно идентифицировать возникающие события и риски и адекватно реагировать на них, обеспечивая позитивный настрой, работоспособность и необходимый уровень коллективного безопасного поведения всех членов экипажа. По аналогии с деятельностью человека в боевых условиях, где основным фактором, определяющим ее психологическую специфику, принято считать опасность, задачей психологической подготовки и особенностью ее организации фактически является формирование у будущего командира адекватной и контролируемой реакции на процесс управления космонавтами в процессе всего полета.

Возможный вариант психологической подготовки командира можно традиционно подразделить на общую, специальную и целевую. Общий/базовый курс состоит из изучения основных положений тех дисциплин (педагогики, психологии, конфликтологии, медицины и т.д.), без знаний которых невозможно формирование и развитие организаторских ПВК. Специальная психологическая подготовка

проводится как в процессе всех известных элементов (тренировок к действиям экипажа после нештатной посадки, тренажерной, специальной парашютной подготовки и т.д.), так и в моделирующих и аналоговых условиях. Такие занятия осуществляются по специальным сценариям в составе условного экипажа, когда проигрываются различные алгоритмы и варианты решения групповых задач и принятия командиром управленческих решений при широком использовании средств, виртуально воспроизводящих реальные события и условия деятельности, вероятные риски и опасности жизнедеятельности человека. В процессе реализации целевой подготовки, осуществляемой в составе конкретного экипажа, когда моделируются фрагменты программы реального межпланетного полета, обеспечивается дальнейшее развитие у командира организаторских ПВК, их преобразование в единое системное качество, составляющее психологическую основу личности командира.

Выводы

1. Важнейшим элементом психологической готовности человека к исполнению обязанностей командира автономного межпланетного экипажа является наличие у него организаторских профессионально важных качеств.
2. В процессе предварительной оценки организаторских ПВК при отборе кандидатов и их развития на всех этапах подготовки космонавтов происходит формирование системного качества – личности командира экипажа межпланетной миссии.
3. Наличие и успешность формирования этого системного качества во многом будет определять в будущем надежное выполнение полетного задания путем поддержания командиром коллективного безопасного поведения членов экспедиции за счет их устойчивого позитивного межличностного взаимодействия в условиях длительной и автономной деятельности.

Работа выполнена в рамках темы № 63.2 программы фундаментальных научных исследований РАН.

Список литературы

1. *Ушаков И.Б., Моруков Б.В., Бубеев Ю.А. и др*. Основные результаты психофизиологических исследований в эксперименте «Марс-500» // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. № 3. С. 18–27.

Ushakov I.B., Morukov B.V., Bubeev Yu.A. et al. The main results of psychophysiological research in the «Mars-500» experiment // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2014. V. 84. № 3. P. 18–27.

2. *McPhee J.C., Charles J.B.* (eds.) Human health and performance risks of space exploration missions. Introduction III-IV. 2009. URL: http://ston.jsc.nasa.gov/collections/trs/_techrep/-SP-2009-3405.pdf. Accessed 10 March 2016.

3. *Карпова О.И., Розанов И.А., Швед Д.М. и др*. Психологическая поддержка экипажей пилотируемой космической техники: история, цели, задачи и эффективность // Авиакосм. и экол. мед. 2021. Т. 55. № 2. С. 5–14.

Karpova O.I., Rozanov I.A., Shved D.M. et al. Psychological support for crews of manned space vehicles: history, goals, objectives and effectiveness // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2021. V. 55. № 2. P. 5–14.

4. *Юсупова А.К., Гущин В.И., Ушаков И.Б*. Коммуникации космических экипажей в реальных и моделируемых космических полетах. М., 2011.

Yusupova A.K., Gushchin V.I., Ushakov I.B. Communications of space crews in real and simulated space flights. Moscow, 2011.

5. *Марковский И.А.* Развитие сплоченности летных экипажей военно-транспортной авиации: Дис. … канд. психол. наук. М., 1999.

Markovsky I.A. Development of cohesion of flight crews of military transport aviation: Dis. … kandidata psikhologicheskikh nauk. Moscow, 1999.

6. *Усачев Ю.В*. Дневник космонавта. Три жизни в космосе. М., 2004.

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

7. *Уманский Л.И., Мангутов И.С.* Организатор и организаторская деятельность. Л., 1975.

Umansky L.I., Mangutov I.S. Organizer and organizational activity. Leningrad, 1975.

8. *Бодров В.А., Малкин В.Б., Покровский Б.Л., Шпаченко Д.И*. Психологический отбор летчиков и космонавтов // Проблемы космической биологии / А.М. Уголев, ред. 1984. Т. 48.

Bodrov V.A., Malkin V.B., Pokrovsky B.L., Shpachenko D.I. Psychological selection of pilots and cosmonauts // Problemy of kosmicheskoy biologii / A.M. Ugolev, ed. 1984. V. 48.

9. *Войтенко А.М., Зайцева С.Ю.* Автоматизированный тест «Организаторские профессионально важные качества» // Психофизиология профессионального здоровья человек: Матер. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию образования каф. военной психофизиологии ВМедА. СПб., 2017. С. 67–69.

Voytenko A.M., Zaytseva S.Yu. Automated test «Organizational professionally important qualities» // Psychophysiology of professional human health: Materials of scientific and practical conf., dedicated to the 20th anniversary of the formation of the Department of military psychophysiology of the VMED. St.-Petersburg, 2017. P. 67–69.

Поступила 26.11.2021

MANAGERIAL PROFESSIONALLY IMPORTANT QUALITIES OF THE INTERPLANETARY CREW COMMANDER: STRUCTURE, ASSESSMENT, DEVELOPMENT

Ryumin O.O.[1], Voitenko A.M.[2]

[1]Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow
[2]Kirov Military Medical Academy, St.-Petersburg

The paper speculates on selecting candidates for interplanetary crew commanders with the emphasis on must-have managerial qualities (MMQs) key for successful crew activities and control. The authors introduce the MMQs structure and approach to the MMQs assessment by the example of an AF command flight.

Psychological training is essential for MMQs development and high dependability of interplanetary crew commanders. The training program comprises familiarization with theoretical grounds, practicing various scenarios of team work and commander's role of a manager, and concentration on skills required for accomplishment of a specific mission.

Key words: interplanetary crew commander, selection, managerial must-have qualities, psychological training.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 5–10.

УДК 612.017.2

ВЛИЯНИЕ 21-СУТОЧНОЙ «СУХОЙ» ИММЕРСИИ НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ ВРОЖДЕННОГО ИММУНИТЕТА, АССОЦИИРОВАННЫХ С СИГНАЛЬНЫМИ ПУТЯМИ TOLL-ПОДОБНЫХ РЕЦЕПТОРОВ

Власова Д.Д.[1], Садова А.А.[1], Галина В.С.[2], Германов Н.С.[2, 1], Рыкова М.П.[1], Антропова Е.Н.[1], Кутько О.В.[1], Шульгина С.М.[1], Орлова К.Д.[1], Шмаров В.А.[1], Лысенко Е.А.[1], Пономарев С.А.[1]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Пирогова Минздрава России, Москва

E-mail: dlokatosh@gmail.com

Проведено исследование экспрессии генов врожденного иммунитета 10 практически здоровых мужчин в возрасте от 24 до 32 лет, принимавших участие в эксперименте с использованием 21-суточной «сухой» иммерсии без средств профилактики.

Для оценки работоспособности гуморального звена иммунитета человека были выбраны гены, кодирующие Toll-подобные рецепторы, белки-участники сигнальных путей NF-kB, AP-1, Akt, TLR4, белки-участники апоптоза, гены CLEC4E, HSPD1, PTGS2.

Из периферической крови испытателей были получены моноциты CD14+, из которых были выделены образцы тотальной РНК методом фенол-хлороформной экстракции. Из тотальной РНК методом обратной транскрипции были получены образцы кДНК, которые затем использовались для постановки ПЦР-РВ.

Результаты показали значительные изменения в экспрессии описанных генов врожденного иммунитета, что свидетельствует о существенном влиянии 21-суточной «сухой» иммерсии на работу системы Toll-подобных рецепторов на транскрипционном уровне на самых ранних этапах развития иммунного ответа.

Ключевые слова: Toll-like-рецепторы, образ-распознающие рецепторы, врожденный иммунитет, «сухая» иммерсия, экспрессия генов.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 11–19.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-11-19

Более полувека назад человек озадачился покорением новой среды обитания – космического пространства. Выбираясь из «колыбели», человечество сталкивается с новыми для себя факторами осваиваемой окружающей среды (космоса): радиацией, длительным пребыванием в ограниченном герметичном пространстве, перегрузками и, конечно, отсутствием силы тяжести. Все они являются стрессорами, затрагивающими так или иначе каждую из систем организма и имеющими пролонгированное действие, сопряженное со множеством осложнений. Как известно, постоянство внутренней среды и нормальное функционирование организма контролируются всеми системами организма, среди которых наименее изученной как в области нормальной и патологической физиологии, так и в свете космической биологии, является иммунитет. Накопленные данные позволяют утверждать, что различные факторы космического полета (КП) оказывают негативное влияние на отдельные звенья системы иммунитета, истощая ее резервные возможности [1, 2].

Изменения, происходящие в иммунной системе во время орбитальных миссий и в наземных экспериментах, моделирующих отдельные факторы КП, отражаются на сдвиге продукции цитокинов клетками периферической крови, подавлении антиген-специфичной активации лимфоцитов, изменении экспрессии молекул на клеточной поверхности лимфоцитов, снижении уровня циркулирующих естественный киллеров (NK) с высокой цитокинпродуцирующей способностью и с высокой цитотоксической активностью, снижении цитотоксичности NK-клеток, разнонаправленных изменениях в содержании моноцитов и гранулоцитов, экспрессирующих Toll-подобные рецепторы и т.д. [3, 4].

Перестройки в работе иммунитета возникают из-за изменений, происходящих на внутриклеточном и ядерном уровне: внешние стрессоры могут стимулировать как увеличение, так и снижение экспрессии генов, кодирующих белки-участники сигнальных каскадов иммунного ответа. Эти вариации могут быть вызваны и эпигенетическими перестройками (изменением профиля метилирования ДНК), и сдвигами в количестве регуляторных белков и РНК, отвечающих за контроль транскрипции [5, 6]. Так, было показано, что во время КП в фибробластах человека происходит увеличению экспрессии генов, относящихся к семействам TNF и IL, и эти изменения ассоциированы с запуском провоспалительных реакций [7]. В экспериментах с мышами, пребывающими в условиях КП, и модельном эксперименте

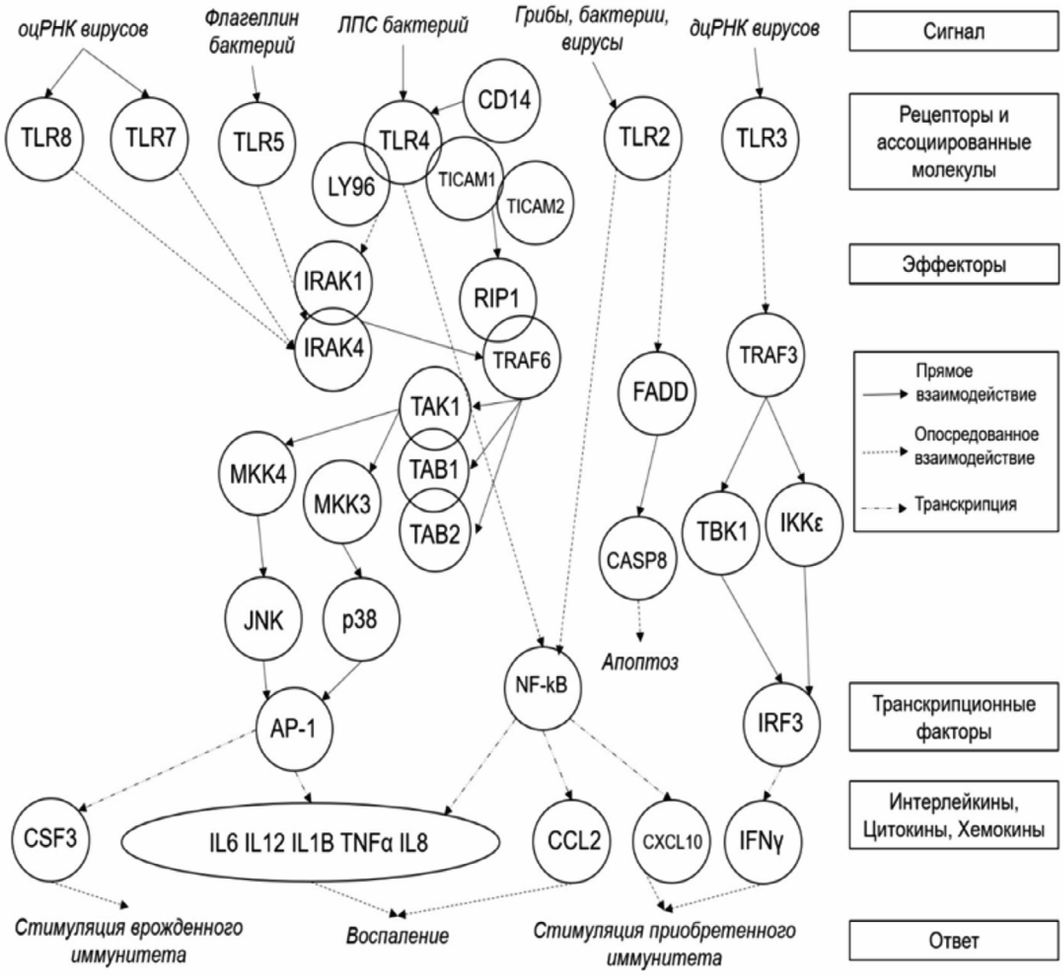


Рис. 1. Схематичное изображение Toll-подобных рецепторов и основных участников их сигнальных путей

на клеточных культурах с использованием машины случайного позиционирования (RPM) было показано снижение экспрессии цитокинов (IL2, IFNG, и др.) [8].

Однако описанные наблюдения продемонстрированы в основном на клеточных культурах и в экспериментах с животными, а исследование генов, кодирующих белки-участники сигнальных каскадов иммунного ответа, у космонавтов не проводилось. Принимая во внимание возможность дальних пилотируемых экспедиций, в которых члены экипажа будут вынуждены действовать автономно, актуальным является изучение работы иммунной системы человека на самой ранней стадии развития иммунного ответа – на транскрипционном уровне. Учитывая технические трудности проведения подобных экспериментов, многофакторность воздействия на иммунную систему человека в условиях космического полета, а также отсутствие данных, демонстрирующих влияние космического полета на экспрессию генов врожденного иммунитета, оправдано использование для этих целей наземные модельные эксперименты с участием человека. Одним из таких модельных экспериментов является «сухая» иммерсия (СИ), позволяющая достаточно точно смоделировать воздействие таких факторов космического полета как опорная разгрузка, гиподинамия и перераспределение жидкостей в краниальном направлении [9].

Для оценки влияния 21-суточной «сухой» иммерсии на работоспособность врожденного иммунитета на транскрипционном уровне были выбраны гены следующих групп:

– кодирующие Toll-подобные рецепторы;
– сигнального пути Nf-kB;
– AP1-сигнального пути;
– TLR4 -сигнального пути;
– Akt – сигнального пути;
– кодирующие белки, участвующие в апоптозе.

Кроме того, были выбраны гены, не попадающие в указанные группы: ген *PTGS2*, кодирующий белок циклооксигензы-2, который участвует в превращении арахидоновой кислоты в простагландин H2 и является предшественником протсациклина,

экспрессируемого при воспалении; *HSPD1* – ген, кодирующий белок шаперонина, который участвует в импорте митохондриальных белков и сборке макромолекул [10]; ген *CLEC4E*, кодирующий образ-распознающий рецептор, реагирующий на микобактериальный тригалозо-6,6′-димиколат и образующий функциональный комплекс с гамма цепью Fc-рецептора [11]. Все перечисленные гены являются белок-кодирующими, и их продукты принимают участие в сигнальных путях, ассоциированных с Toll-подобными рецепторами (рис. 1).

Методика

Эксперимент с 21-суточной СИ без средств профилактики был проведен на стендовой базе «Сухая иммерсия» на территории ГНЦ РФ – ИМБП РАН с участием 10 практически здоровых мужчин в возрасте от 24 до 32 лет, получивших допуск врачебно-экспертной комиссии и подписавших Информированное согласие на участие в эксперименте в соответствии с Хельсинкской декларацией. Программа исследования была утверждена на заседании ученого совета (протокол № 6 от 27.06.2018) и одобрена Комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 483 от 03.08.2018 г.). Добровольцы-испытатели прошли врачебно-экспертную комиссию и подписали Информированное согласие на участие в эксперименте в соответствии с Хельсинкской декларацией.

В ходе эксперимента испытуемые в течение 21 сут находились в горизонтальном положении без физических упражнений с умеренным ограничением движения в иммерсионной ванне, наполненной водопроводной водой, температура которой поддерживалась постоянной на уровне плюс 33 ± 10 °С. Испытуемый был отделен от воды водонепроницаемой пленкой, площадь поверхности которой значительно превышает площадь поверхности воды. Подробное описание эксперимента с использованием 21-суточной «сухой» иммерсии представлено в работе [9].

Взятие венозной крови у испытуемых проводилось утром натощак на 7-е и 3-и сутки до эксперимента, на 3-и, 7-е, 14-е, 21-е сутки во время эксперимента и на 7-е сутки после эксперимента. Для последующих исследований выделялись CD14+-моноцитов с применением системы магнитной сепарации MidiMACS (Myltenyi Biotec, Германия). Клетки сохраняли в реагенте RNAlater (ThermoFisher Scientific, США) согласно рекомендациям производителя или сразу приступали к выделению РНК.

Выделение тотальной РНК из моноцитов проводили методом фенол-хлороформной экстракции с использованием реагента ExtractRNA (Евроген, Россия). К осадку ~1–2 млн клеток добавляли 500 мкл реагента и 200 мкл хлороформа, ценрифугировали при 15 000 g, водную фазу отбирали в стерильную пробирку и преципитировали РНК добавлением равного объема изопропилового спирта и 1 мкл соосадителя Satellite Red (Евроген, Россия) на образец, центрифугировали при 20 000 g при 4 °С в течение 40 мин. Осадок РНК промывали 75%-ным этанолом, растворяли в деионизированной воде (Евроген, Россия). Затем образцы РНК обрабатывали ДНКазой I (ThermoFisher Scientific, США) согласно протоколу производителя, инкубировали 30 мин при 37 °С, реакцию останавливали добавлением EDTA. После образцы хранили при -80 °С или приступали к синтезу кДНК.

Для обратной транскрипции использовали около 1мкг РНК, предварительно обработанной ДНКазой I, реакцию проводили в объеме 10 мкл с использованием набора MMLV RT kit (Евроген, Россия): к образцу добавляли 2 мкл 5X буфера, 1 мкл DTT, 1 мкл dNTP, 1 мкл Oligo-dT праймера, 1 мкл фермента, доводили объем деионизированной водой. Образцы инкубировали 40 мин при 42 °С, затем тестировали качество кДНК методом количественной ПЦР и по результатам готовили разведения в 25–50 раз.

Аликвоты кДНК использовали для проведения ПЦР в реальном времени с применением AB StepOnePlus Real-Time PCR system и реагента SYBR Green reagent qPCRmix-HS SYBR+HighROX (Евроген, Россия) согласно инструкциям компании-производителя реагента. Все реакции проводились в двух-трех повторностях и включали отрицательный контроль, в котором вместо кДНК было добавлено соответствующее количество разведенной РНК. Праймеры подбирали на основании последовательностей мРНК в базе данных NCBI, используя онлайн-программу Primer-BLAST, дополнительно проверяли подобранные пары в программе MFEprimer. В реакционную смесь праймеры добавляли из рассчета 0,2 мМ на реакцию, предварительно убедившись в специфичности и однородности продуктов амплификации. Протокол амплификации для оценки относительной экспрессии генов состоял из 40 циклов: 95 °С – 15 сек, 60 °С – 30 сек, 72 °С – 45 сек со считыванием флуоресценции после стадии элонгации. По завершении амплификации дополнительно проводили анализ кривых плавления для оценки специфичности ПЦР-продуктов.

Результаты ПЦР в реальном времени анализировали с помощью программ StepOnePlus Software, Microsoft Excel. Относительную экспрессию генов оценивали методом ΔΔCt, в качестве референсного гена использовали TBP, в качестве референсного образца – фон (-7-е сутки).

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 10. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Вилкоксона. Достоверными считали различия при уровне значимости $p < 0,05$.

Таблица

Показатели RQ экспрессии генов врожденного иммунитета у добровольцев-испытателей, участников эксперимента с 21-суточной «сухой» иммерсией без средств профилактики (Me)

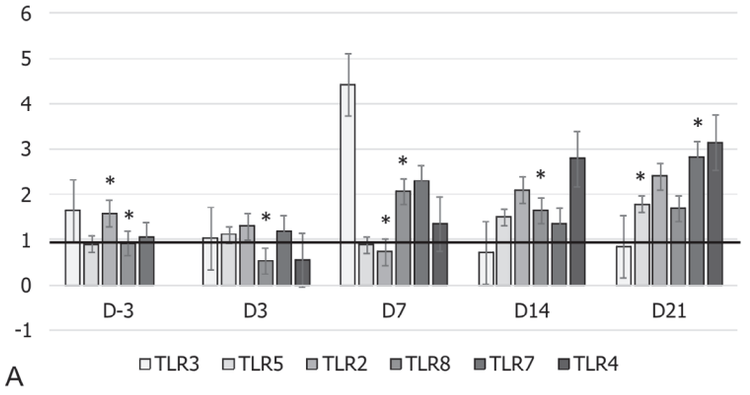
Ген	Время обследования				
	D-3	D3	D7	D14	D21
TLR2	1,586*	1,298	0,734*	2,103	2,407
TLR3	1,638	1,035	4,426	0,723	0,86
TLR4		0,56	1,348	2,793	3,144
TLR5	0,905	1,118	0,889	1,501	1,788*
TLR7	1,046	1,199	2,308	1,354	2,818*
TLR8	0,93*	0,532*	2,065*	1,645*	1,697
TRAF6		1,392	5,746	4,323	6,205
TAB1		1,428	2,308	2,304	1,595
NF-kBα	1,336*	0,289*	0,734*	1,071*	0,895*
LY96		1,011	0,597*	1,164	1,422
HMGB1	1,427	1,0107	0,672	1,33	1,418
MKK3	1,641*	0,443	2,539*	1,783*	1,459*
MKK4	0,759	0,963	1,111	1,183	1,269
UBE2N		0,765	0,962	1,319	1,055
IRAK1	0,885	0,904	2,454*	5,095*	2,177
MAPK13		0,846	0,233	1,631	1,31
IL10	1,962*	1,477*	2,294*	3,636*	3,085*
IL6	3,687	0,223*	0,261*	1,734	0,648
IL12A	0,774	1,221	0,284*	0,613*	0,564
IL1A		0,543	0,291	1,188	1
IL8	1,625*	0,296*	0,49*	1,826*	1,735*
IL1B		0,138	0,338	2,214	1,856
CCL2		0,127	0,038	0,514	0,961
CXCL10		0,792	0,942	1,197	1,016
TNF	1,018	0,136*	0,488	1,175	0,939
FADD	1,322	1,427*	2,027*	2,077*	1,101*
CASP8	0,926	1,085	1,448*	1,587*	1,432*
PTGS2	3,391*	0,276*	0,752	3,549*	0,975

Примечание. * – достоверное отличие с -7-ми сутками ($p < 0,05$).

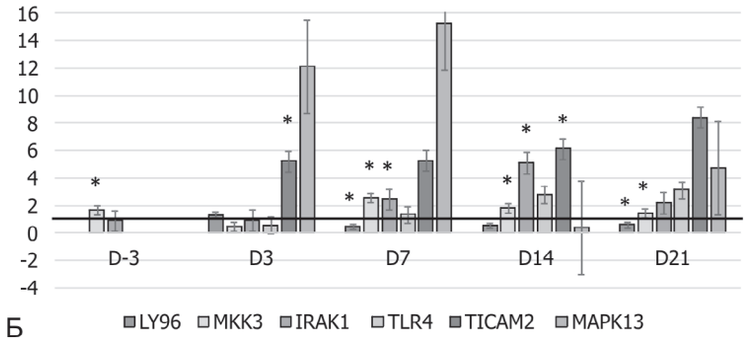
Результаты и обсуждение

Изучение генов врожденного иммунитета человека имеет отдельный интерес, так как врожденный иммунитет – это стартовая площадка для формирования адаптивного иммунного ответа. Следовательно, нарушения или некие адаптационные изменения в формировании гуморального ответа на ядерном уровне под действием каких-либо факторов космического полета повлекут за собой последующие сдвиги в работе клеточного иммунитета.

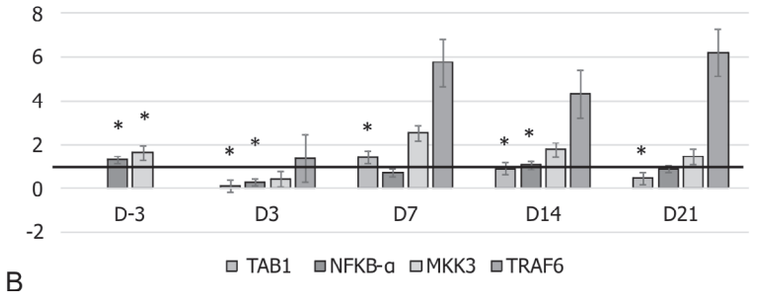
Результаты, полученные в эксперименте с СИ, представлены в таблице.



А



Б



В

Рис. 2. Относительная экспрессия (Me) генов врожденного иммунитета.

А – относительная экспрессия генов Toll-подобных рецепторов; Б – относительная экспрессия генов TLR4-сигнального пути; В – относительная экспрессия генов NF-kB-сигнального пути; по оси ординат – относительная экспрессия, представленная в виде медианы и межквартильного интервала; по оси абсцисс – время обследования; черная жирная линия – фоновый показатель; * – статистически достоверные отличия от фона ($p < 0,05$)

Гены Toll-подобных рецепторов *(TLR1, TLR2, TLR3, TLR4, TLR5, TLR7, TLR8)*

Семейство образ-распознающих рецепторов TLR распознает большое количество эволюционно консервативных патогенов, которые по большей части представляют собой структурные компоненты грибов, вирусов и бактерий, но также способны реагировать на компоненты клеток хозяина, например, TLR4 связывается с белками теплового шока, фибриногеном и участками гиалуроновой кислоты [12].

Среди группы генов, кодирующих Toll-подобные рецепторы, в 21-суточной СИ без средств профилактики наблюдалась общая тенденция к повышению экспрессии на протяжении всего эксперимента в среднем до 3 раз. Достоверные изменения экспрессии были получены для генов *TLR2* на -3-и и 7-е сутки, *TLR5* на 21-е сутки и *TLR8* в течение всего эксперимента в сравнении с исходным уровнем. В случае остальных генов выявленные изменения не являлись достоверными. У гена *TLR8* происходило двукратное снижение экспрессии на 3-и сутки применения иммерсии. На 7-е сутки эксперимента экспрессия повышалась в среднем до 2–2,5 раз, после чего падала на 14-е сутки до фоновых показателей. Наконец, на 21-е сутки снова происходило увеличение экспрессии. У остальных генов описываемой группы в течение всего времени СИ экспрессия повышается вплоть до 21-х суток воздействия, не опускаясь до фоновых значений. Исключение составляет ген *TLR2* на 7-е сутки эксперимента, когда его экспрессия достоверно падала в 2 раза (рис. 2).

Гены TLR4-опосредованного пути *(FADD, HMGB1, MKK3,4, UBE2N, IRAK1, IRAK4, LY96, CASP8, MAPK13, TICAM1, TICAM2, CD14, C-FOS, MAP3K1, IFNG)*

В результате процесса связывания лиганда и рецептора запускается определенный каскад передачи сигнала в зависимости от рецептора. После связывания Toll-подобного рецептора с лигандом возможно 2 варианта развития событий: передача сигнала по MyD88-зависимому пути или передача сигнала по TRIF-зависимому пути. Первым способом пользуются все TLRs, кроме TLR3. TLR4 в отличие от остальных рецепторов своего семейства способен использовать оба эти сигнальные каскады. Поэтому были выбраны гены сигнального именно этого рецептора.

Анализируя экспрессию генов TLR4-пути, можно отметить общую закономерность в повышении экспрессии к концу эксперимента и в некоторых случаях возвращение к фоновым значениям на 21-е сутки эксперимента. Достоверные изменения экспрессии были получены для следующих генов: *TICAM2* на 3-и, 14-е и 21-е сутки – повышение показателей с пиком на 14-е сутки в 2 раза, причем такая тенденция наблюдается и у гена *TLR4* (см. рис. 2). Это

представляет интерес, так как *TICAM2* – это ключевой фактор при реализации MyD88-независимого пути каскада TLR4 [13]. Кроме того, экспрессия гена *LY96*, который кодирует адаптерный белок, без соединения с которым рецептор TLR4 не способен распознать свой главный лиганд – ЛПС [13], носит такой же характер – повышается к 21-м суткам СИ со снижением до 2 раз на 7-е сутки. Все это указывает на инициацию TLR4-сигнального каскада на транскрипционном уровне.

Экспрессия гена *IRAK1* достоверно повышалась на 7-е в 2,5 раза и на 14-е стуки в 5 раз. Несмотря на отсутствие достоверных изменений в экспрессии гена *MAPK13* (см. рис. 2) наблюдалась схожая тенденция: падение экспрессии на 7-е сутки эксперимента и повышение на 14-е сутки (см. рис. 2). Полученные данные по экспрессии генов TLR4-сигнального каскада свидетельствуют о запуске сигнального пути на транскрипционном уровне, причем пик активности приходился на 14-е сутки воздействия иммерсии. Также происходит инициация как MyD88-зависимого пути (повышение экспрессии генов *IRAK1, MKK3, MAPK13*) и MyD88-независмого пути (повышение экспрессии гена *TICAM2*, которое повторяет динамику экспрессии гена *TLR4* и *LY96*). Принимая во внимание достоверные изменения в экспрессии генов TLR-рецепторов, можно говорить о запуске достаточно обширного и крайне важного сегмента врожденного иммунитета.

Гены Nf-kB- *(TRAF6, TAB1, NFKBIA, CHUK (IKKA))* и AP-1сигнальных путей *(MKK, TAK1, C-FOS, MAPK13)*

MyD88-зависимый и TRIF-зависимый сигнальные пути пересекаются и включают в себя другие сигнальные каскады. Так, сигнальный путь Nf-kB является компонентом TLR4-сигнального пути. Nf-kB представляет собой семейство высоко консервативных транскрипционных факторов, включающее в себя гены *NF-κB1 (p50/p105), NF-κB2 (p52/p100), RelA (p65), c-Rel* и *RelB*, которые регулируют воспалительный процесс, клеточный рост и апоптоз. Основная функция данного пути – это регуляция апоптоза. Например, при аденовирусной инфекции Nf-kB запускает апоптоз, а в случае HIV, EBV и гепатита С активация Nf-kB предотвращает апоптотическую реакцию [14].

Достоверные изменения экспрессии генов Nf-kB-сигнального пути на протяжении всего воздействия были обнаружены только для гена *NFKBIA*. Экспрессия данного гена снижалась на 3-и стуки в 5 раз, после повышалась до исходных значений к концу эксперимента. Известно, что уменьшение транскрипции этого гена, отвечающего за пролиферацию, дифференциацию и миграцию клеток наблюдается в культурах клеток, подвергающихся воздействию космического полета [15]. Динамика экспрессии генов *TRAF6* и *TAB1* отличалась от динамики экспрессии *NFKBI-a.*: экспрессия генов *TRAF6* и *TAB1* (см. рис. 2) возрастала к 7-м суткам эксперимента, но в первом случае экспрессия оставалась повышенной вплоть до конца эксперимента, а во втором – на 21-е сутки экспрессия не отличалась от фоновых значений (см. рис. 2).

В процессе реализации MyD88-сигнального пути запускается каскад митоген-активируемых киназ, который в свою очередь активирует митоген-активируемую киназу JNK, запуская тем самым сигнальный путь AP-1. AP-1 – это группа структурно и функционально схожих генов семейств Jun *(c-Jun, JunB, JunD)* и семейства Fos *(c-Fos, FosB, Fra-1, Fra-2)*. AP-1 сигнальный каскад способен активировать такие процессы в клетке как пролиферация, цикл клеточного деления и апоптоза [16]. При изучении экспрессии генов сигнального пути AP-1 были получены достоверные изменения только для гена *MKK3*: на 7-е сутки воздействия наблюдалось увеличение уровня экспрессии гена в 2,5 раза, к 21-м суткам он возвращался к фоновым значениям.

Гены интерлейкинов, цитокинов, хемокинов *(IL10, IL6, IL12A, IL1A, IL8, IL1B, CCL2, CXCL10, CSF3, BTK)*

Akt-сигнальный путь представлен генами интерлейкинов, цитокинов и хемокинов, которые участвуют в процессах развития воспаления, а также его предотвращения.

При изучении экспрессии генов, участвующих в Akt-сигнальном пути, достоверные изменения были получены для генов, кодирующих цитокины, секретируемые моноцитами. Так, *IL12A* демонстрировал 5-кратное снижение экспрессии на 7-е сутки эксперимента и снижение экспрессии в 1,6 раза на 14-е сутки. Экспрессия IL6 снижалась в 5 раз на 3-и и 7-е сутки воздействия, после которых наступало двукратное увеличение экспрессии относительно фонового показателя. Такая динамика изменения экспрессии IL6, оказывающего провоспалительный и иммунно-стимулирующий эффект, привлекает внимание, поскольку данные в литературе разнятся: в исследованиях с моделированием микрогравитации с использованием RWV в клеточных культурах показано лишь незначительные изменения секреции этого белка [17], в то время как реальный КП приводил к увеличению экспрессии гена IL6 [15]. При стимуляции лигандами к TLR после СИ происходит снижение секреции как *IL12*, так и *IL6* в культуре моноцитов [18].

Начиная с 3-х суток пребывания в «сухой» иммерсии *IL10* демонстрировал повышение экспрессии вплоть до 21-х суток с максимальным пиком увеличения в 3,5 раза на 21-е сутки. Это согласуется с результатами опубликованных работ, в которых показано, что в активированных макрофагах происходит увеличение синтеза и секреции *IL10* в

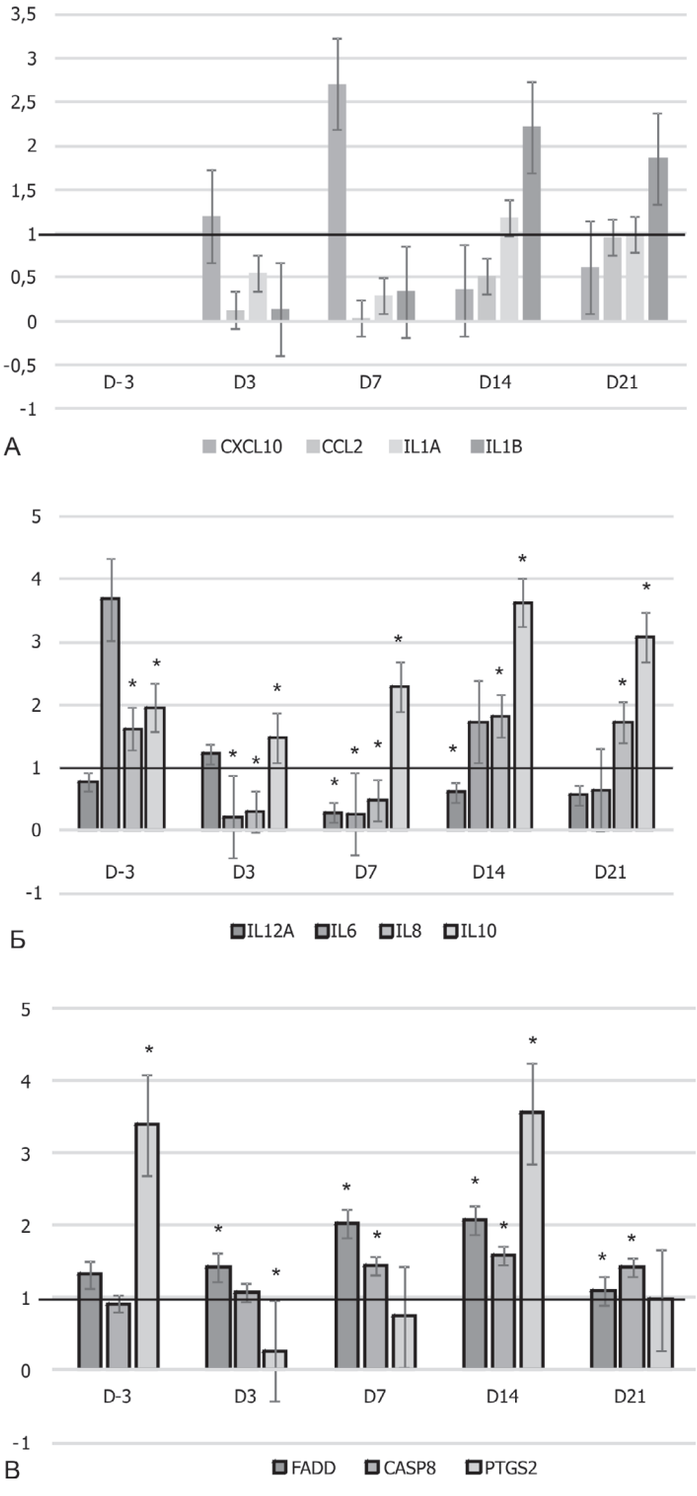


Рис. 3. Относительная экспрессия (Me) генов врожденного иммунитета.

А, Б – относительная экспрессия генов Akt-сигнального пути; В – относительная экспрессия генов, участвующих в апоптозе; по оси ординат – относительная экспрессия, представленная в виде медианы и межквартильного интервала; по оси абсцисс – время обследования; черная жирная линия – фоновый показатель; * – статистически достоверные отличия от фона ($p < 0,05$)

условиях моделирования микрогравитации с помощью RWV [17].

Экспрессия гена *IL8* достоверно снижалась в 5 раз на 3-и и 7-е сутки эксперимента и увеличивалась к концу воздействия на 14-е и 21-е сутки. Эти данные согласуются с результатами опубликованной в литературе работы: снижение экспрессии мРНК провоспалительных цитокинов, в частности, *IL8* при одновременном снижении секреции соответствующих белков отмечается как при моделировании эффектов микрографитации с использованием машины случайного позиционирования, так и во время космического полета (19). Для генов *CXCL10*, *CCL2*, *IL1A* и *IL1B* не было получено достоверных изменений в экспрессии, однако тенденция сохранялась – снижение на 3-и и 7-е сутки (у *CCL2* в 33 раза), и повышение на 14-е и 21-е сутки воздействия (рис. 3).

Гены апоптоза *(TNF, FADD, CASP8)*

Для всех выбранных генов белков, участвующих в апоптозе, были получены достоверные изменения. У генов *FADD* и *CASP8* экспрессия изменялась по общей закономерности: повышалась ближе к концу эксперимента (максимально двукратное увеличение на 14-е сутки воздействия). Исключение составляла экспрессия гена *TNFa*, которая достоверно снижалась на 3-и сутки воздействия в 10 раз (см. рис. 3). Изменение синтеза этого белка иммунными клетками было показано при исследовании цитокинового профиля испытуемых в 21-суточной СИ [18].

Экспрессия *CLE4CE, HSPD1* и *IFNG* не менялась. На за трое суток до иммерсии и после 14 суток воздействия наблюдалось увеличение экспрессии в 3,5 раза. В то время как на 3-и сутки иммерсии происходило падение экспрессии в 5 раз. К 21-м суткам иммерсии экспрессия гена не отличалась от фоновых значений. Связывание микобактериального трегалозо-6,6′-димиколата (TDM) с *CLE4CE* приводит к фосфорилированию мотива активации иммунорецептора на основе тирозина (ITAM) FCER1G, вызывая активацию SYK, CARD9 и NF-каппа-B, что приводит к созреванию антигенпрезентирующих клеток и формирование антигенспецифического прайминга Т-клеток в сторону эффекторных Т-хелперов 1 и Т-хелперов 17 подтипов клеток [11].

Выводы

1. «Сухая» иммерсия без средств профилактики оказывает влияние на работу врожденного иммунитета на транскрипционном уровне:

– повышает экспрессию генов, кодирующих Toll-подобные рецепторы;

– инициирует сигнальный каскада TLR4, а также MyD88- зависимый и TRIF-зависимый сигнальные пути Toll-подобных рецепторов;

– запускает работу каскадов MAP-киназ, MAPK-киназ, ассоциированных с рецептором интерлейкина 1 (IRAK);

– повышает экспрессию генов как про-, так и противоспалительных цитокинов, но отсутствие изменений в экспрессии хемокинов;

– увеличивает экспрессии некоторых генов апоптоза.

2. 21-суточная «сухая» иммерсия вызывает активацию TLR-зависимого звена врожденного иммунитета на ядерном уровне, что может свидетельствовать о напряженном состоянии врожденного иммунитета. Длительное напряжение иммунной системы может в дальнейшем привести к истощению физиологических резервов организма.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-75-10086-П.

Список литературы

1. *Моруков Б.В. и др*. Показатели врожденного и адаптивного иммунитета у космонавтов после длительных космических полетов на Международной космической станции // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 3. С. 19–30.

Morukov B.V. et al. Indicators of innate and adaptive immunity in astronauts after long-term space flights on the International space station // Fiziologiya cheloveka. 2010. V. 36. № 3. P. 19–30.

2. *Газенко О.Г., Григорьев А.И., Егоров А.Д*. Реакции организма человека на условия космического полета / О.Г. Газенко, И.И. Касьян, ред. М., 1990. С. 15–48.

Gazenko O.G., Grigoriev A.I., Egorov A.D. Reactions of the human body to the conditions of space flight / O.G. Gazenko, I.I. Kasyan, eds. Moscow, 1990. P. 15–48.

3. *Пономарёв С.А. и др*. Состояние системы сигнальных образ-распознающих рецепторов моноцитов и гранулоцитов периферической крови космонавтов до и после длительных полетов на Международную космическую станцию // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50. № 5. С. 18.

Ponomarev S.A. et al. The state of the system of signal pattern-recognizing receptors of monocytes and granulocytes in the peripheral blood of astronauts before and after long-term flights to the International space station // Aviakos-micheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2016. V. 50. № 5. P. 18.

4. *Пономарев С.А. и др.* Состояние системы сигнальных образ-распознающих рецепторов семейства Toll-like-моноцитов и гранулоцитов человека во время 21-суточной «сухой» иммерсии без средств профилактики // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53. № 2. С. 36–42.

Ponomarev S.A. et al. The state of the system of signal pattern-recognition receptors of the Toll-like-human monocytes and granulocytes during a 21-day «dry» immersion without preventive measures // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2019. V. 53. № 2. P. 36–42.

5. *Chowdhury B. et al*. A study of alterations in DNA epigenetic modifications (5mC and 5hmC) and gene expression influenced by simulated microgravity in human lymphoblastoid cells // PLoS One. 2016. V. 11. № 1. e0147514.

6. *Garrett-Bakelman F.E. et al.* The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight // Sci. 2019. V. 364. № 6436. eaau8650.

7. *Semov A. et al.* Alterations in TNF- and IL-related gene expression in space-flown WI38 human fibroblasts // FASEB J. 2002. V. 16. № 8. P. 899–901.

8. *Martinez E.M. et al.* Spaceflight and simulated microgravity cause a significant reduction of key gene expression in early T-cell activation // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2015. V. 308. № 6. P. R480–R488.

9. *Ward N.E. et al.* Gene expression alterations in activated human T-cells induced by modeled microgravity // J. Cell Biochem. 2006. V. 99. № 4. P. 1187–1202.

10. *Томиловская Е.С. и др*. 21-суточная «сухая» иммерсия: особенности проведения и основные итоги // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 5–14.

Tomilovskaya E.S. et al. 21-day «dry» immersion: features and main results // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2020. V. 54. № 4. P. 5–14.

11. *Viitanen P.V. et al*. Mammalian mitochondrial chaperonin 60 functions as a single toroodal ring // J. Biol. Chem. 1992. V. 267. № 2. P. 695–698.

12. *Furukawa A. et al.* Structural analysis for glycolipid recognition by the C-type lectins Mincle and MCL // Proc. Natl. Acad. Sci. 2013. V. 110. № 43. P. 17438–17443.

13. *Kumagai Y., Takeuchi O., Akira S.* Pathogen recognition by innate receptors // J. Infect. Chemother. 2008. V. 14. № 2. P. 86–92.

14. What is the NF-κB pathway? [Цитировано: 01 02 2022 г.] URL: https://www.mechanobio.info/what-is-mechanosignaling/signaling-pathways/what-is-the-nf-%CE%BAb-pathway/.

15. *Hess J., Angel P., Schorpp-Kistner M*. AP-1 subunits: quarrel and harmony among siblings // J. Cell Sci. 2004. V. 117. № 25. P. 5965–5973.

16. *Melnik D. et al.* The CellBox-2 mission to the International space station: thyroid cancer cells in space // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. № 16. P. 8777.

17. *Oshiumi H. et al.* TIR-containing adapter molecule (TICAM)-2, a bridging adapter recruiting to toll-like receptor 4 TICAM-1 that induces interferon-beta // J. Biol. Chem. 2003. V. 278. № 50. P. 49751–4762.

18. *Ludtka C., Moore E., Allen J.B*. The effects of simulated microgravity on macrophage phenotype // Biomed. 2021. V. 9. № 9. P. 1205.

19. *Пономарев С.А., Рыкова М.П., Антропова Е.Н*. Цитокиновый профиль испытателей-добровольцев в 21-суточной «сухой» иммерсии // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 2. С. 76–83.

Ponomarev S.A., Rykova M.P., Antropova E.N. Cytokine profile of test volunteers in 21-day «dry» immersion // Fiziologiya cheloveka. 2020. V. 46. № 2. P. 76–83.

Поступила 01.03.2022

EFFECT OF 21-DAY DRY IMMESRION ON EXPRESSION OF INBORN IMMUNITY GENES ASSOCIATED WITH THE TOLL-LIKE RECEPTORS' SIGNALIING PATHWAYS

Vlasova D.D.[1], Sadova A.A.[1], Galina V.S.[2], Guermanov N.S.[1, 2], Rykova M.P.[1], Antropova E.N.[1], Kutko O.V.[1], Shulguina S.M.[1], Orlova K.D.[1], Shmarov V.A.[1], Lysenko E.A.[1], Ponomarev S.A.[1]

[1]Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow
[2]Pirogov Russian National Research Medical University of Ministry of Health of Russia, Moscow

Expression of inborn immunity genes was studied in 10 essentially healthy male subjects aged 24 to 32 years in a 21-day dry immersion experiment without countermeasures.

To evaluate the humoral immunity function, genes encoding Toll-like receptors, proteins mediating NF-kB, AP-1, Akt, TLR4; apoptosis proteins, and CLEC4E, HSPD1, PTGS2 were selected.

Fenol-cloroform extraction was used to obtain total RNA from peripheral blood monocytes CD14+. Subsequently, total RNA was reverse transcribed to generate cDNA for real-time PCR.

The results showed substantial changes in expression of these genes suggesting that changes in the TLRs function on the transcriptional level were at the very start of the immune response to 21-d DI.

Key words: Toll-like receptors, image-recognizing receptors. Inborn immunity, dry immersion, gene expression.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 11–19.

УДК 612.74

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИРУЕМОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ РАЗГРУЗКИ НА СОСТОЯНИЕ САТЕЛЛИТНЫХ КЛЕТОК КАМБАЛОВИДНОЙ МЫШЦЫ

Вильчинская Н.А.[1], Рожков С.В.[1], Комарова М.Ю.[1, 2], Дмитриева Р.И.[2], Шенкман Б.С.[1]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург

E-mail: vilchinskayanatalia@gmail.com

Проведен анализ ряда маркеров, характеризующих терминальную стадию дифференцировки сателлитных клеток камбаловидной мышцы после действия моделируемой гравитационной разгрузки разной длительности.

Для моделирования гравитационной разгрузки применяли модель антиортостатического вывешивания крыс по методу Ильина – Новикова в модификации Морей-Холтон. Для исследования состояния сателлитных клеток камбаловидной мышцы крыс после действия гравитационной разгрузки был использован метод культивирования in vitro. С помощью метода вестерн-блоттинга определяли содержание mTORc1, фосфо-p70S6K, фосфо-ACC, фосфо-FOXO1 и фосфо- FOXO3, участвующих в регуляции процессов пролиферации и дифференцировки сателлитных клеток мышц. Для определения уровня экспрессии десмина и AMPKa1 применяли ПЦР анализ.

Показано, что после 7-х и 14-х суток вывешивания наблюдалось повышение интенсивности процессов дифференцировки сателлитных клеток камбаловидной мышцы, рост активности транскрипционных факторов FOXO1 и FOXO3.

Ключевые слова: камбаловидная мышца, сателлитные клетки, гравитационная разгрузка, миогенные регуляторные факторы, десмин, AMPK.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 20–29.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-20-29

Эффекты влияния невесомости на организм человека и экспериментальных животных широко описаны в литературе [1–5]. Среди последствий влияния невесомости на организм важное место отводиться исследованию атрофических процессов скелетных мышц, прежде всего ответственных за поддержание позы, таких как камбаловидная мышца. Дисфункция постуральных мышц развивается уже с первых часов действия гравитационной разгрузки [6–8] и приводит к изменению функциональной активности сигнальных путей в мышечных волокнах, контролирующих фундаментальные клеточные процессы, такие как синтез и распад белка, экспрессия сократительных и регуляторных белков, энергетический метаболизм [9, 10]. При этом последствия влияния невесомости на регенеративные процессы в скелетных мышцах практически не освещены.

Наличие и функциональная активность специфических одноядерных клеток – сателлитных клеток в мышце лежит в основе регенераторных процессов мышечной ткани при ее повреждениях и росте мышц в постнатальный период [11]. Сателлитные клетки мышц расположены между базальной пластинкой и плазматической мембраной мышечного волокна [12]. Популяция сателлитных клеток мышечных волокон не однородна и их количество различно в разных типах мышц. В нормальных условиях (неповрежденной мышце) сателлитные клетки находятся в состоянии покоя на стадии G0 клеточного цикла. При повреждении мышц происходит активация сателлитных клеток и они вступают в клеточный цикл [13]. Сателлитные клетки активируются, начинают пролиферировать, образуют новые сателлитные клетки и миобласты, которые дифференцируются и образуют новые волокна скелетных мышц. Состояние мышечных сателлитных клеток можно охарактеризовать по специфическому набору экспрессируемых миогенных регуляторных факторов (МРФ). Так, в стадии покоя мышечные сателлитные клетки экспрессируют преимущественно PAX7 (Paired Box Protein Pax-7)(+)/MYF5 (Myogenic factor 5)(+/-), при их активации и пролиферации начинает экспрессироваться МРФ–MYOD (myoblast determination protein 1), на стадии дифференцировки – MYOD, миогенин и MRF4 (Myogenic factor 6), при слиянии миоцитов и созревании миотуб – миогенин, MRF4, MHC (Myosin heavy chain), десмин [12–16]. В регуляции активности мышечных сателлитных клеток задействованы ростовые факторы, провоспалительные цитокины, оксид азота, множество сигнальных путей, в том числе пути Notch и Wnt [17–19].

Данные о действии гравитационной разгрузки на сателлитные клетки скелетных мышц немногочисленны и противоречивы [22]. Отмечено уменьшение общего числа сателлитных клеток в камбаловидной мышце крыс после 7- и 14-суточного

моделирования гравитационной разгрузки [23, 24]. У мышей в m.soleus, m.gastrocnemius и m.plantaris также наблюдалось снижение количества сателлитных клеток после 2-недельного антиортостатического вывешивания [25]. Кроме того, отмечалось снижение пролиферативных свойств и дифференцировки сателлитных клеток при повреждении мышц на фоне длительного воздействия микрогравитации [24, 26]. Одновременно с этим было показано, что во время 30-суточного космического полета мышей наблюдалась активация и дифференцировка мышечных сателлитных клеток [27]. После 7-суточной иммобилизации задних конечностей мышей наблюдалась активация мышечных сателлитных клеток на фоне снижения их общего количества [28].

Возникает вопрос: зафиксированные при действии микрогравитации изменения сателлитных клеток являются следствием снижения общего числа клеток или обусловлены изменениями поведения этих клеток? Большинство исследований сателлитных клеток после действия микрогравитации были проведены на срезах мышечный ткани и являются неинформативными относительно состояния самих клеток и их регенераторных способностей. В связи с этим мы решили применить методики культивирования in vitro для исследования сателлитных клеток камбаловидной мышцы крыс после действия гравитационной разгрузки различной длительности. Цель нашей работы – проанализировать дифференцировку сателлитных клеток камбаловидной мышцы in vitro после действия гравитационной разгрузки.

Методика

Для оценки регенеративного потенциала сателлитных клеток камбаловидной мышцы был проведен эксперимент с моделированием гравитационной разгрузки на протяжении 1, 3, 7 и 14 сут. Моделирование гравитационной разгрузки осуществляли с помощью модели антиортостатического вывешивания задних конечностей крыс по методу Новикова – Ильина в модификации Morey-Holton et al. (2005) [29, 30]. Для эксперимента было отобрано 50 самцов крыс линии Wistar массой 180–200 г: интактный контроль (С), 1-суточное вывешивание (1HS), 3-суточное вывешивание (3HS), 7-суточное вывешивание (7HS), 14-суточное вывешивание (14HS). Животные содержались при температуре 20–22 °С, вода и корм грызунам давались без ограничения (ad libitum), в соответствии с рационом для лабораторных животных. Все процедуры с животными были одобрены Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН (протокол № 581 от 28.05.2021 г.). После завершения эксперимента у каждого животного под наркозом (внутрибрюшинно бромэтанол 750 мг/кг) из обеих ног была выделена камбаловидная мышца m. soleus. Далее камбаловидные мышцы использовались для выделения пула мышечных сателлитных клеток. Выделение сателлитных клеток из m. soleus проводилось по стандартному протоколу [31–33] с некоторыми изменениями. Полученные мышцы измельчали и помещали в свежеприготовленный 0,1%-ный раствор коллагеназы II типа (Sigma-Aldrich, США) в DMEM с 1%-ным антибиотиком (penicillin-streptomycin, Invitrogen, США) и 1%-ным L-glutamine (Invitrogen, США) и инкубировали 1,5 часа при +37 °С. После чего супернатант удалялся, а клеточный осадок несколько раз промывался теплой культуральной средой DMEM с добавлением 10%-ной лошадиной сыворотки (Gibco, США) и 1%-ным антибиотиком. При промывке клеточный осадок активно пипетировали для окончательного разрушения связи стволовой клетки с миофибриллой. Полученной суспензии давали отстояться 2 минуты для осаждения крупных фрагментов, а надосадочную жидкость переносили в чистую пробирку. Полученные препараты центрифугировали при 300 g, 5 минут. Надосадочную жидкость переносили в новый флакон и центрифугировали при 1000g в течение 10 минут. После чего супернатант удалялся, а полученный осадок растворяли в среде DMEM, содержащей 1 % penicillin-streptomycin, 1 % L-glutamine, 1 % куриной эмбриональной сыворотки (USBiological, США), 20 % FBS (HyClone, США), 10 % horse-serum (Gibco, США). Затем полученный раствор диссоциированных и измельченных мышечных волокон переносили в культуральные чашки, заранее покрытые Geltrex (Invitrogen, США). Культуральную среду меняли через день. По прошествии нескольких дней, когда сателлитные клетки покинули свою нишу и стали видимыми в микроскоп, проводили разделение популяций сателлитных клеток от фибро-адипогенных предшественников методом селекции по адгезии [29]. На следующий день после получения чистой популяции сателлитные клетки достигали субконфлюентого состояния (в культуре появлялись признаки спонтанной дифференцировки, т.е. происходило слияние отдельных миобластов без присутствия внешнего стимула) и запускалась их миогенная дифференцировка. Миогенную дифференцировку клеток проводили в дифференцировочной среде, состоящей из DMEM с добавлением 1 % L-glutamine (Invitrogen, США), 1 % антибиотика penicillin-streptomycin (Invitrogen, США) и 2 % horse-serum (Gibco, США) [29]. Чистота полученной популяции сателлитных клеток оценивалась по окрашиванию специфическим маркером PAX7 (92 % клеток Pax7+). Для исследования брались сателлитные клетки, находящиеся на 5-м дне миогенной дифференцировки.

Гель-электрофорез и иммуноблоттинг

Для выделения цитоплазматической фракции белков из мышечных сателлитных клеток

использовали набор реагентов NE-PER Nuclear and Cytoplasmic Extraction («Thermo Scientific», США). Содержание белка в пробах определяли, используя набор Quick Start Bradford Protein Assay (Bio-Rad Laboratories, США) для определения оптимального объема образца для проведения электрофореза. Электрофорез проводился в 10%-ном ПААГ при 17 мА на гель в мини-системе (Bio-Rad Laboratories) при комнатной температуре. Электроперенос белков проводился на нитроцеллюлозную мембрану при 100 В при температуре 4 ºС в течение 120 мин в системе mini Trans-Blot (Bio-Rad Laboratories). После электропереноса мембраны блокировались в растворе 5%-го сухого молока (Bio-Rad Laboratories) в TBST в течение 1 ч при комнатной температуре. Для выявления белковых полос были использованы первичные антитела anti-phospho ACC (Cell signaling, 1:500), anti-ACC (Cell signaling, 1:500), anti-phospho-p70S6K (Santa Cruz Biotechnology, 1:500), anti-p70S6K (Cell signaling, 1:500), anti-phospho-FOXO3 (Cell signaling, 1:500), anti-FOXO3 (Cell signaling, 1:400), anti-phospho-FOXO1 (Cell signaling, 1:500), anti-FOXO1 (Cell signaling, 1:500), anti-mTORC1 (Cell signaling, 1:500), вторичные антитела goat-anti-rabbit, goat-anti-mouse конъюгированные с пероксидазой хрена (Santa Cruz, 1:30 000). Инкубация мембран с первичными антителами проводилась в 5 % BSA в TBST в течение 14 часов при 4 °С, со вторичными антителами – 1 ч при комнатной температуре. Далее мембраны отмывались 3 раза по 10 мин в TBST. Выявление белковых полос осуществлялось с помощью набора ImmunStar Substrate Kit (BioRad Laboratories) и сканера C-DiGit Blot Scanner (LI-COR Biotechnology, США). Белковые полосы анализировали с использованием программного обеспечения Studio Digits Ver. 4.0. Все измерения плотности изображений проводились в линейном диапазоне проявляющего реагента и сканера. Среднее оптического поглощения (ОП) полос вывешенной группы делили на среднее ОП полос соответствующей контрольной группы, отличия выражали в процентах. Среднее ОП полос контрольной группы принимали за 100 %. Статистическая обработка данных производилась с помощью программы Image Studio Digits Ver 4.0. Статистический анализ полученных экспериментальных данных был проведен с помощью однофакторного дисперсионного анализа с post-hoc критерием Тьюки для множественных сравнений. Результаты приведены в виде средних значений ± стандартная ошибка среднего. Достоверными считали различия при $p < 0,05$.

ПЦР анализ

Для оценки экспрессии мРНК миогенных регуляторных факторов в сателлитных клетках m. soleus проводили выделение тотальной РНК с помощью реагента ExtractRNA (Евроген, Россия) согласно рекомендациям производителя. Обратную транскрипцию проводили с использованием 0,5 мкг РНК и набора для проведения обратной транскрипции RevertAid RT Kit (Thermoscientific, Литва) при 37 °С в течение 60 мин согласно стандартному протоколу. Полученные образцы кДНК хранили при –80 °С. Далее проводилась ПЦР в реальном времени с использованием интеркалирующего красителя SYBR Green I в амплификаторе CFX96 Touch Real-Time PCR Detection System, (Bio-Rad Laboratories, США). Для проведения ПЦР в реальном времени использовали праймеры, последовательности которых представлены в табл. 1. В качестве референсного гена использовали ген GAPDH. Анализ полученных данных осуществлялся по методу Ливака (2-ΔΔCt). Статистический анализ полученных экспериментальных данных был проведен с помощью однофакторного дисперсионного анализа с post-hoc критерием Тьюки для множественных сравнений. Результаты приведены в виде средних значений ± стандартная ошибка среднего. Достоверными считали различия при $p < 0,05$.

Таблица 1

Список примененных в работе праймеров

Название гена	Последовательность праймеров
Myog	5′-ggtcccaacccaggagatca-3′ 5′-acatatcctccaccgtgatgc-3′
Myod1	5′- tgctctgatggcatgatgga -3′ 5′- ctggacgcctcactgtagta -3′
Gapdh	5′- cggtgtgaacggatttggc-3′ 5′- ttgaggtcaatgaaggggtcg-3′
Prkaa1	5′-atagccgacttcggtctttca-3′ 5′-cagggcctgcgtacaatctt-3′
Des	5′-tgctcaatgtgaagatggcct-3′ 5′-gatcggaaggttgatcctgct-3′

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния моделируемой микрогравитации непосредственно на камбаловидную мышцу крыс было проведено измерение мышечной массы. Наблюдалось характерное снижение массы m. soleus на 30 % после 3 сут вывешивания, на 40 % после 7 сут вывешивания и на 50 % после 14 сут вывешивания (табл. 2). Полученный результат согласуется с данными предыдущих исследований, показавших снижение мышечной массы камбаловидной мышцы начиная с 3 сут вывешивания, которое сопровождалось развитием атрофических процессов и снижением процессов белкового синтеза [8, 31]. При исследовании срезов камбаловидной мышцы крыс после 3- и 7-суточной моделируемой гравитационной разгрузки было зафиксировано уменьшение количества сателлитных клеток [21, 32].

Для оценки регенеративных способностей сателлитных клеток был проанализирован ряд параметров, характеризующих сателлитные клетки камбаловидной мышцы крыс на стадии их терминальной дифференцировки после действия моделируемой гравитационной разгрузки разной длительности.

В первую очередь оценивали динамику экспрессии миогенных регуляторных факторов MyoD и миогенин. MyoD начинает экспрессироваться в активно пролиферирующих миобластах и при их дифференцировке. После 7-х и 14-х суток вывешивания в сателлитных клетках камбаловидной мышцы наблюдался повышенный уровень экспрессии мРНК MyoD по сравнению с контрольными животными (рис. 1, А). После 3-х суток вывешивания достоверных отличий от группы контроля не было выявлено (см. рис. 1, А). Уровень экспрессии мРНК MyoD в сателлитных клетках после 1-суточного вывешивания был достоверно повышен относительно контрольных значений, но значительно ниже, чем после 7-х и 14-х суток вывешивания (см. рис. 1, А).

Как известно, MyoD стимулирует экспрессию миогенина [34]. Этот фактор способствует выходу сателлитных клеток из клеточного цикла и дальнейшей дифференцировке в миотубы. Экспрессия мРНК миогенина после 1- и 3-суточного вывешивания не отличалась от уровня контрольной группы (см. рис. 1, Б). После 7-х и 14-х суток вывешивания наблюдалось увеличение экспрессии мРНК миогенина по сравнению с контрольными значениями (см. рис. 1, Б).

Для оценки того, как проходит дифференцировка сателлитных клеток камбаловидной мышцы после действия гравитационной разгрузки анализировалась экспрессия мРНК десмина, так как известно, что 95 % мышечных сателлитных клеток крыс экспрессируют десмин на терминальных стадиях дифференцировки [35]. Достоверных изменений уровня экспрессии мРНК десмина после 1-х и 3-х суток вывешивания не обнаружили. Однако после 7-х и 14-х суток вывешивания наблюдалось увеличение экспрессии мРНК десмина по сравнению с контрольной группой (рис. 2, А).

Таблица 2

Масса камбаловидной мышцы после действия гравитационной разгрузки

Группа	Вес m.Sol, мг	Вес m.Sol, мг/Вес крысы, г
C	75,91±2,88	0,3233±0,0095
HS1	69,27±2,41	0,3392±0,0127
HS3	59,6±1,49*	0,2924±0,0101*
HS7	47,24±2,64*	0,222±0,012*
HS14	42,17±1,65*	0,1827±0,0064*

Примечание. C – контроль; HS1 – 1-суточное вывешивание; HS3 – 3-суточное вывешивание; HS7 – 7-суточное вывешивание; HS14 – 14-суточное вывешивание. * – достоверное отличие от «C» ($p \leq 0,05$).

Таким образом, на терминальной стадии дифференцировки сателлитных клеток камбаловидной мышцы крыс, подвергшихся 7- и 14-суточному действию моделируемой гравитационной разгрузки, отмечали увеличение экспрессии миогенных регуляторных факторов – MYOD и миогенина, а также десмина по сравнению с сателлитными клетками камбаловидной мышцы контрольных животных (рис. 1–2, А).

В работе Mitchell и соавторов было показано снижение общего количества сателлитных клеток в мышцах мышей и уменьшение популяции MYOD-позитивных клеток. Рост мышечных сателлитных клеток, выделенных из атрофированной мышцы после 14-х суток вывешивания, в культуре был значительно замедлен относительно сателлитных клеток, выделенных из контрольных мышц. Сателлитные клетки, выделенные из атрофированной мышцы, формировали редкие небольшие миотубы лишь к 7-м суткам дифференцировки, в отличие миосателлитов, изолированных из контрольной мышцы [23]. В данной работе проводилось исследование объединенной популяции сателлитных клеток мышей, выделенных из 3 мышц *m. gastrocnemius*, *m. soleus* и *m. plantaris*. Как известно, количество и состав популяции сателлитных клеток в разных типах мышц отличается [35].

Мы исследовали популяцию сателлитных клеток, выделенных из камбаловидной мышцы крыс. В данном исследовании наблюдали диаметрально противоположную картину, более быстрое и активное развитие: сателлитные клетки, выделенные из камбаловидной мышцы крыс после 7-х и 14-х суток вывешивания начинали формировать миотубы уже на 2-й день их дифференцировки (рис. 1, В).

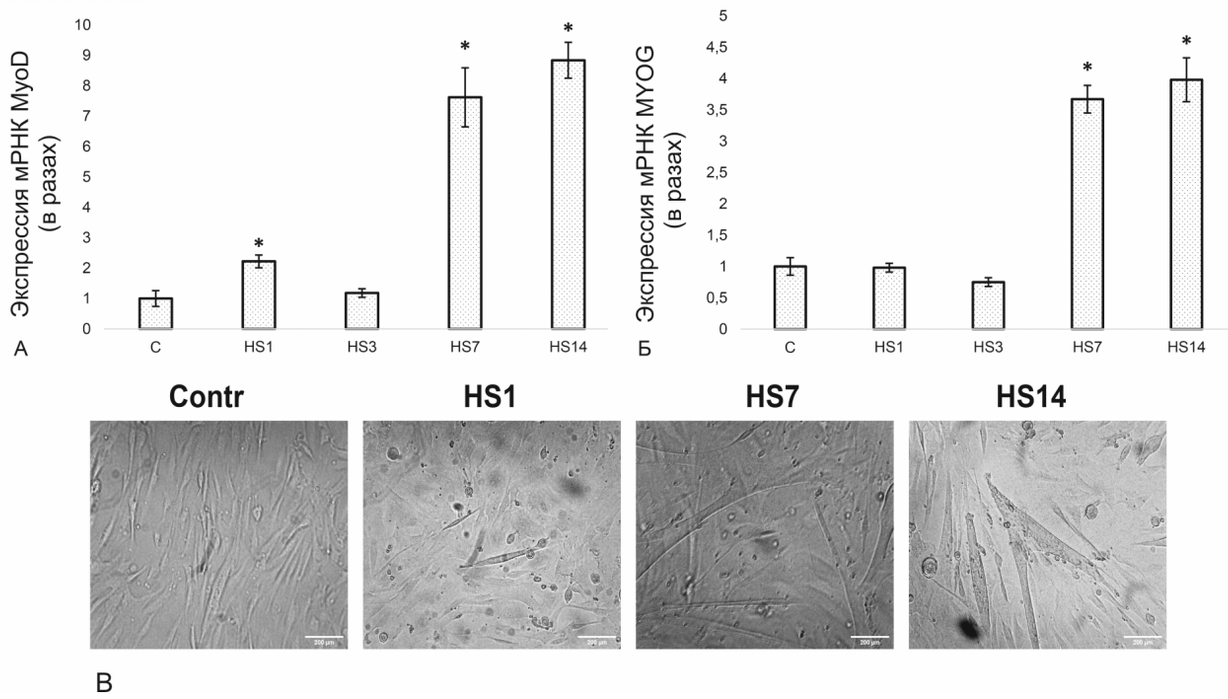


Рис. 1. Динамика экспрессии мРНК миогенных регуляторных факторов миогенина (А) и MyoD (Б) в сателлитных клетках камбаловидной мышцы при действии моделируемой гравитационной разгрузки.
Здесь и на рис. 2–5: С – контроль; HS1 – 1-суточное вывешивание; HS3 – 3-суточное вывешивание; HS7 – 7-суточное вывешивание; HS14 – 14-суточное вывешивание. Результаты представлены в виде в виде средних значений ± стандартная ошибка среднего; * – достоверное отличие от «С» ($p \leq 0,05$)

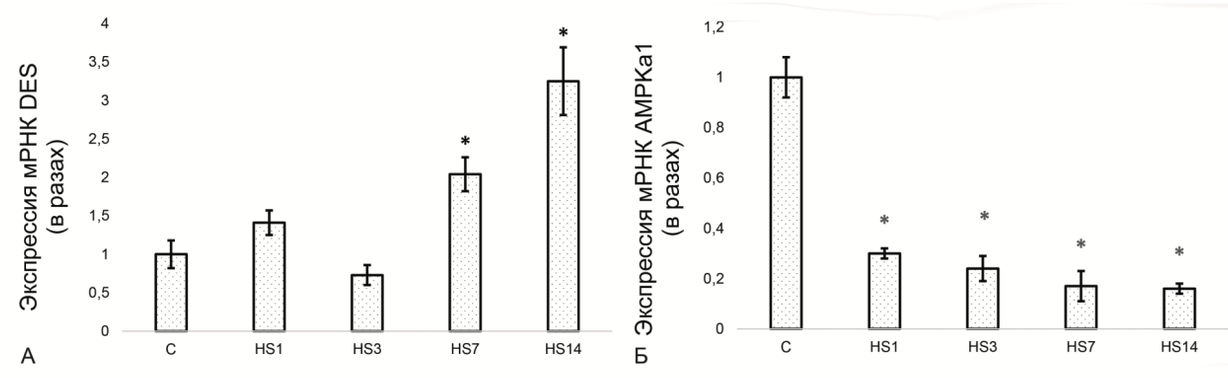


Рис. 2. Динамика экспрессии мРНК десмина (А) и AMPKa1 (Б) в сателлитных клетках камбаловидной мышцы при действии моделируемой гравитационной разгрузки

Ускоренное развитие миотуб хорошо согласуется с усилением экспрессии мРНК MYOD, миогенина и десмина. Расхождение полученных результатов с работой Mitchell и соавторов, вероятно, связано с различиями миозинового фенотипа камбаловидных мышц мышей и крыс и отличиями в составе популяций сателлитных клеток этих мышц.

После 14-суточного антиортостатического вывешивания в камбаловидной мышце крыс наблюдалось снижение содержания дифференцирующихся MYOD и миогенин-позитивных клеток [22]. Важно отметить, что эти исследования были проведены на срезах камбаловидной мышцы и в большей степени отражают феномен снижения общего числа сателлитных клеток при разгрузке, а не оценивают уровень экспрессии MYOD и миогенина и собственно активность сателлитных клеток в этих условиях.

У мышей после 7-суточной иммобилизации мышц задних конечностей было обнаружено увеличение экспрессии MyoD в сателлитных клетках на фоне

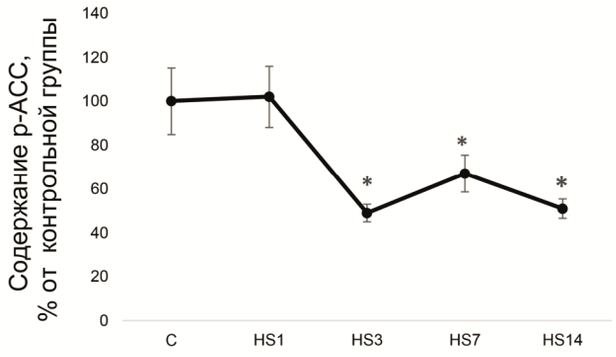


Рис. 3. Содержание фосфо-pACC в цитоплазматической фракции белков сателлитных клеток камбаловидной мышцы при действии моделируемой гравитационной разгрузки

снижения их общего количества, т.е. клетки находились на стадии миогенных клеток-предшественников и вступали в дифференцировку [26].

Итак, при длительном воздействии микрогравитации в сателлитных клетках камбаловидной мышцы происходит увеличение экспрессии миогенина, MyoD и десмина, сопровождаемое ускоренным формированием миотуб, что сигнализирует о преждевременном вступлении этих клеток в процесс дифференцировки и может привести к образованию мышечных волокон с функциональными нарушениями.

Наряду с этим, было проведено исследование ряда сигнальных путей, регулирующих активность сателлитных клеток при повреждении мышц. В регуляции активности сателлитных клеток на разных стадиях клеточного цикла преимущественно задействована AMPKa1 (5′-AMP-activated protein kinase catalytic subunit alpha-1) [36–38]. Уровень экспрессии мРНК AMPKa1 в сателлитных клетках *m. soleus* на поздней стадии дифференцировки был достоверно снижен по сравнению с группой контроля во всех экспериментальных группах (рис. 2, Б). Удалось оценить активность АМРК на белковом уровне по изменению фосфорилирования ее основного субстрата – ACC (Acetyl-CoA carboxylase) (рис. 3). Было обнаружено достоверное снижение содержания фосфо-ACC после 3-х суток вывешивания на 70 %, после 7-х суток на 40 % и на 60 % после 14-х суток вывешивания по сравнению с контрольной группой (рис. 3). После первых суток вывешивания фосфорилирование ACC не отличалось от контрольной группы (рис. 3). Изменения фосфорилирования ACC хорошо соотносятся с изменениями экспрессии AMPKa1.

Механизмы, участвующие в снижении экспрессии AMPKa1 в сателлитных клетках при действии гравитационной разгрузки пока не ясны. Ранее в работах с нокаутными животными по гену AMPKa1 было показано полное блокирование регенеративных процессов в мышце после ее повреждения. При этом чрезмерный уровень активности АМРК ослабляет процессы пролиферации и дифференцировки сателлитных клеток [39, 40]. Однако мы обнаружили снижение экспрессии и активности АМРК по сравнению с контрольным уровнем на фоне активации дифференцировки сателлитных клеток камбаловидной мышцы после 7- и 14-суточного вывешивания. По данным литературы поддержание определенного уровня активности АМРК необходимо для нормального функционирования мышечных сателлитных клеток и для ингибирования процессов апоптоза [41]. Можно предположить, что снижение экспрессии и активности АМРК на поздней стадии дифференцировки мышечных сателлитных клеток на фоне увеличенной активности их дифференцировки при длительном воздействии гравитационной разгрузки делает эти клетки более уязвимыми для апоптоза.

Сигнальный путь mTOR (mammalian target of rapamycin) является важным регулятором активности сателлитных клеток и важен для поддержания регенеративных процессов в мышцах [42]. Ранее было неоднократно показано влияние гравитационной разгрузки на сигнальный путь mTOR [43]. Проведено исследование содержания mTORc1 в цитоплазматической фракции белков мышечных сателлитных клеток камбаловидной мышцы после моделируемой гравитационной разгрузки различной длительности (рис. 4, А). Достоверных отличий от контрольной группы обнаружено не было. Далее оценивали содержание одного из эффекторов сигнального пути mTOR-фосфорилированной формы p70S6K (Ribosomal Protein S6 Kinase B1) (рис. 4, Б). После 1-х и 3-х суток вывешивания наблюдалась тенденция к повышению содержания фосфо-p70S6K по сравнению с контрольным уровнем. В результате 7- и 14-суточного вывешивания содержание фосфо-p70S6K не отличалось от уровня контрольной группы. Полученные данные хорошо согласуются с предыдущими исследованиями, где было показано увеличение активности этой киназы в камбаловидной мышце крыс при краткосрочном действии микрогравитации [8]. Однако непонятно каким образом увеличение активности сигнального пути mTOR сказывается на сателлитных клетках, так как дифференцировка сателлитных клеток после 1-х и 3-х суток вывешивания не отличается от таковой у контрольных животных. Вероятно, на данном этапе дифференцировки сателлитных клеток в условиях действия гравитационной разгрузки сигнальный путь mTOR не задействован в регуляции экспрессии миогенных регуляторных факторов.

Транскрипционные факторы семейства FOXO (Forkhead Box Proteins) (FOXO1 и FOXO3) участвуют в регуляции пролиферации и дифференцировки мышечных сателлитных клеток [44–46]. Ранее в исследованиях in vivo было показано, что при действии

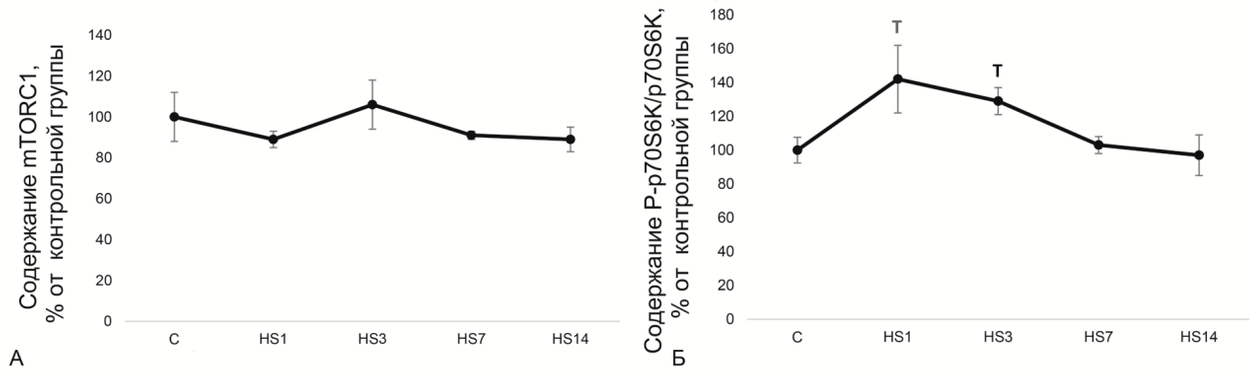


Рис. 4. Содержание mTORC1 (А) и фосфо-p70S6K (Б) в цитоплазматической фракции белков сателлитных клеток камбаловидной мышцы при действии моделируемой гравитационной разгрузки

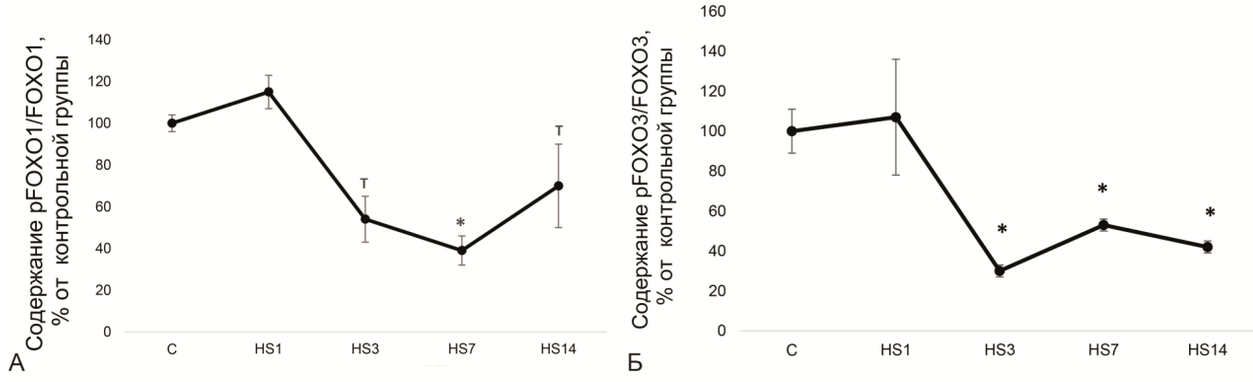


Рис. 5. Содержание фосфо-FOXO1 (А) и фосфо-FOXO3 (Б) в цитоплазматической фракции белков сателлитных клеток камбаловидной мышцы при действии моделируемой гравитационной разгрузки

гравитационной разгрузки в m. soleus наблюдается увеличение активности транскрипционного фактора FOXO3 (происходит его дефосфорилирование) [47]. Было проанализировано содержание фосфо-FOXO3 и фосфо-FOXO1 в цитоплазматической фракции белков сателлитных клеток камбаловидной мышцы после действия моделируемой гравитационной разгрузки (рис. 5). Выявлено достоверное снижение содержания фосфо-FOXO3 после 3-х, 7-х и 14-х суток вывешивания относительно контрольной группы (рис. 5, Б). Содержание фосфо-FOXO1 было достоверно снижено после 7 суток вывешивания, а после 3-х и 14-х суток вывешивания была выявлена тенденция к снижению содержания фосфо-FOXO1 (рис. 5, А).

Таким образом, мы обнаружили увеличение активности транскрипционного фактора FOXO3 и FOXO1 в сателлитных клетках камбаловидной мышцы после действия моделируемой гравитационной разгрузки (см. рис. 5). Эти данные хорошо согласуются с тем, что было ранее показано в исследованиях непосредственно в камбаловидной мышце [46]. FOXO3 является важным регулятором сигнального пути Notch и задействован в пополнении пула сателлитных клеток при регенерации мышц [43]. FOXO3 является транскрипционным активатором экспрессии MyoD в пролиферирующих и дифференцирующихся миобластах [47]. Вероятно, увеличение активности FOXO3 на поздних стадиях дифференцировки сателлитных клеток мышц при длительном действии гравитационной разгрузки способствует увеличению экспрессии MyoD и более раннему вступлению клеток в дифференцировку (см. рис. 5, Б, рис. 1, Б). Активация транскрипционного фактора FOXO1 негативно влияет на пролиферацию и дифференцировку миобластов [44]. Однако на терминальных стадиях дифференцировки сателлитных клеток активная работа FOXO1 необходима для контроля скорости слияния миотуб [48]. По всей видимости, увеличение активности транскрипционного фактора FOXO1 в сателлитных клетках камбаловидной мышце после длительного действия микрогравитации, приводит к увеличению скорости слияния миотуб, что хорошо соотносится с данными об увеличении интенсивности дифференцировки этих клеток.

Проведенное исследование показало изменение экспрессии миогенных регуляторных факторов, мышечных маркеров и активности некоторых сигнальных регуляторов на поздней стадии дифференцировки сателлитных клеток в результате предшествующей моделируемой гравитационной разгрузки. Эти изменения свидетельствуют об аномальном ускорении процессов дифференцировки. Механизмы развития этих изменений неясны. Однако данные современной литературы позволяют думать, что в основе этих изменений лежат эпигеномные сдвиги в сателлитных клетках [49], заложенные еще в «спящем» состоянии в разгруженной мышце. Природу и механизмы этих сдвигов еще предстоит выяснить.

Выводы

При длительном воздействии микрогравитации в сателлитных клетках камбаловидной мышцы наблюдается ускорение процессов их дифференцировки, которое сопровождается повышенной активностью транскрипционных факторов FOXO1 и FOXO3 и может приводить к образованию мышечных волокон с функциональными нарушениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-75-10080.

Список литературы

1. *Козловская И.Б., Киренская А.И., Сирота М.Г.* Сравнительный анализ влияния невесомости и ее моделей на скоростно-силовые свойства и тонус скелетных мышц человека // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1984. Т. 18. С. 22–26.

Kozlovskaya I.B., Kirenskaya A.I., Sirota M.G. Comparative analysis of the effect of weightlessness and its models on the speed-strength properties and tone of human skeletal muscles // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. V. 18. P. 22–26.

2. *Оганов В.С., Скуратова С.А., Мурашко Л.М. и др.* Влияние кратковременных космических полетов на физиологические свойства и состав миофибриллярных белков скелетных мышц крыс // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1988. Т. 4.

Oganov V.S., Skuratova S.A., Murashko L.M. et al. Impact of short-term space flights on the physiological properties and composition of myofibrillar proteins in rat skeletal muscles // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. V. 4.

3. *Baldwin K.M., Haddad F., Pandorf C.E. et al.* Alterations in muscle mass and contractile phenotype in response to unloading models: role of transcriptional/ pretranslational mechanisms // Front. Physiol. 2013. V. 4. P. 284.

4. *Bodine S.C.* Disuse-induced muscle wasting // Int. J. Biochem. Cell Biol. 2013. V. 45. P. 2200–2208.

5. *Chopard A., Hillock S., Jasmin B.J.* Molecular events and signalling pathways involved in skeletal muscle disuse-induced atrophy and the impact of countermeasures // J. Cell Mol. Med. 2009. V. 13. P. 3032–3050.

6. *Chibalin A.V., Benziane B., Zakyrjanova G.F. et al.* Early endplate remodeling and skeletal muscle signaling events following rat hindlimb suspension // J. Cell Physiol. 2018. V. 233. P. 6329–6336.

7. *Kravtsova V.V., Paramonova I.I., Vilchinskaya N.A. et al.* Chronic ouabain prevents Na,K-ATPase dysfunction and targets AMPK and IL-6 in disused rat soleus muscle // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22.

8. *Giger J.M., Bodell P.W., Zeng M. et al.* Rapid muscle atrophy response to unloading: pretranslational processes involving MHC and actin // J. Appl. Physiol. (1985). 2009. V. 107. P. 1204–1212.

9. *Kandarian S.C., Stevenson E.J.* Molecular events in skeletal muscle during disuse atrophy // Exerc. Sport Sci. Rev. 2002. V. 30. P. 111–116.

10. *Mirzoev T., Tyganov S., Vilchinskaya N. et al.* Key markers of mTORC1-dependent and mTORC1-independent signaling pathways regulating protein synthesis in rat soleus muscle during early stages of hindlimb unloading // Cell Physiol. Biochem. 2016. V. 39. P. 1011–1020.

11. *Charge S.B., Rudnicki M.A.* Cellular and molecular regulation of muscle regeneration // Physiol. Rev. 2004. V. 84. P. 209–238.

12. *Mauro A.* Satellite cell of skeletal muscle fibers // J. Biophys. Biochem. Cytol. 1961. V. 9. P. 493–495.

13. *Bischoff R.* Interaction between satellite cells and skeletal muscle fibers // Development. 1990. V. 109. P. 943–952.

14 *Dumont N.A., Bentzinger C.F., Sincennes M.C., Rudnicki M.A.* Satellite cells and skeletal muscle regeneration // Compr. Physiol. 2015. V. 5. P. 1027–1059.

15. *Yablonka-Reuveni Z., Rivera A.J.* Temporal expression of regulatory and structural muscle proteins during myogenesis of satellite cells on isolated adult rat fibers // Dev. Biol. 1994. V. 164. P. 588–603.

16. *Zammit P.S., Heslop L., Hudon V. et al.* Kinetics of myoblast proliferation show that resident satellite cells are competent to fully regenerate skeletal muscle fibers // Exp. Cell Res. 2002. V. 281. P. 39–49.

17. *Brooks N.E., Myburgh K.H.* Skeletal muscle wasting with disuse atrophy is multi-dimensional: the response and interaction of myonuclei, satellite cells and signaling pathways // Front. Physiol. 2014. V. 5. P. 99.

18. *Motohashi N., Asakura A.* Muscle satellite cell heterogeneity and self-renewal // Front. Cell Dev. Biol. 2014. V. 2. P. 1.

19. *Conboy I.M., Rando T.A.* The regulation of Notch signaling controls satellite cell activation and cell fate determination in postnatal myogenesis // Dev. Cell. 2002. V. 3. P. 397–409.

20. *Wagers A.J., Conboy I.M.* Cellular and molecular signatures of muscle regeneration: current concepts and controversies in adult myogenesis // Cell. 2005. V. 122. P. 659–667.

21. *Tidball J.G.* Inflammatory processes in muscle injury and repair // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2005. V. 288. P. R345–353.

22. *Вильчинская Н.А., Шенкман Б.С.* Сателлитные клетки скелетных мышц в условиях гравитационной разгрузки // Рос. физиол. журнал им. И.М. Сеченова. 2021. Т. 107. С. 717–729.

Vilchinskaya N.A., Shenkman B.S. Satellite cells of skeletal muscles under gravitational unloading // Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova. V. 107. P. 717–729.

23. *Шенкман Б.С., Туртикова О.В., Немировская Т.Л., Григорьев А.И.* Сократительная активность скелетной мышцы и судьба миоядер // Acta Naturae. 2010. Т. 2. С. 62–69.

Shenkman B.S., Turtikova O.V., Nemirovskaya T.L., Grigoriev A.I. Contractile activity of skeletal muscle and the fate of myonuclei // Acta Naturae. V. 2. P. 62–69.

24. *Nakanishi R., Hirayama Y., Tanaka M. et al.* Nucleoprotein supplementation enhances the recovery of rat soleus mass with reloading after hindlimb unloading-induced atrophy via myonuclei accretion and increased protein synthesis // Nutr. Res. 2016. V. 36. P. 1335–1344.

25. *Mitchell P.O., Pavlath G.K.* Skeletal muscle atrophy leads to loss and dysfunction of muscle precursor cells // Am. J. Physiol. Cell Physiol. 2004. V. 287. P. C1753–1762.

26. *Matsuba Y., Goto K., Morioka S. et al.* Gravitational unloading inhibits the regenerative potential of atrophied soleus muscle in mice // Acta Physiol. (Oxf.). 2009. V. 196. P. 329–339.

27. *Radugina E.A., Almeida E.A.C., Blaber E. et al.* Exposure to microgravity for 30 days onboard Bion M1 caused muscle atrophy and impaired regeneration in murine femoral Quadriceps // Life Sci. Space Res. (Amst). 2018. V. 16. P. 18–25.

28. *Guitart M., Lloreta J., Manas-Garcia L., Barreiro E.* Muscle regeneration potential and satellite cell activation profile during recovery following hindlimb immobilization in mice // J. Cell Physiol. 2018. V. 233. P. 4360–4372.

29. *Novikov V.E., Ilyin E.A.* Age-related reactions of rat bones to their unloading // Aviat. Space Environ. Med. 1981. V. 52. P. 551–553.

30. *Morey-Holton E.R., Globus R.K.* Hindlimb unloading rodent model: technical aspects // J. Appl. Physiol. (1985). 2002. V. 92. P. 1367–1377.

31. *Smolina N., Kostareva A., Bruton J. et al.* Primary murine myotubes as a model for investigating muscular dystrophy // Biomed. Res. Int. 2015. V. 2015. e594751.

32. *Keire P., Shearer A., Shefer G., Yablonka-Reuveni Z.* Isolation and culture of skeletal muscle myofibers as a means to analyze satellite cells // Methods Mol. Biol. 2013. V. 946. P. 431–468.

33. *Dmitrieva R.I., Lelyavina T.A., Komarova M.Y. et al.* Skeletal muscle resident progenitor cells coexpress mesenchymal and myogenic markers and are not affected by chronic heart failure-induced dysregulations // Stem Cells Int. 2019. V. 2019. e5690345.

34. *Yin H., Price F., Rudnicki M.A.* Satellite cells and the muscle stem cell niche // Physiol. Rev. 2013. V. 93. P. 23–67.

35. *Allen R.E., Rankin L.L., Greene E.A. et al.* Desmin is present in proliferating rat muscle satellite cells but not in bovine muscle satellite cells // J. Cell Physiol. 1991. V. 149. P. 525–535.

36. *Fu X., Zhao J.X., Zhu M.J. et al.* AMP-activated protein kinase alpha1 but not alpha2 catalytic subunit potentiates myogenin expression and myogenesis // Mol. Cell Biol. 2013. V. 33. P. 4517–4525.

37. *Theret M., Gsaier L., Schaffer B. et al.* AMPKalpha1-LDH pathway regulates muscle stem cell self-renewal by controlling metabolic homeostasis // EMBO J. 2017. V. 36. P. 1946–1962.

38. *Fu X., Zhu M., Zhang S. et al.* Obesity impairs skeletal muscle regeneration through inhibition of AMPK // Diabetes. 2016. V. 65. P. 188–200.

39. *Williamson D.L., Butler D.C., Alway S.E.* AMPK inhibits myoblast differentiation through a PGC-1alpha-dependent mechanism // Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 2009. V. 297. P. E304–314.

40. *Fulco M., Cen Y., Zhao P. et al.* Glucose restriction inhibits skeletal myoblast differentiation by activating SIRT1 through AMPK-mediated regulation of Nampt // Dev. Cell. 2008. V. 14. P. 661–673.

41. *Niesler C.U., Myburgh K.H., Moore F.* The changing AMPK expression profile in differentiating mouse skeletal muscle myoblast cells helps confer increasing resistance to apoptosis // Exp. Physiol. 2007. V. 92. P. 207–217.

42. *Zhang P., Liang X., Shan T. et al.* mTOR is necessary for proper satellite cell activity and skeletal muscle regeneration // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2015. V. 463. P. 102–108.

43. *Gopinath S.D., Webb A.E., Brunet A., Rando T.A.* FOXO3 promotes quiescence in adult muscle stem cells during the process of self-renewal // Stem Cell Reports. 2014. V. 2. P. 414–426.

44. *Yamashita A., Hatazawa Y., Hirose Y. et al.* FOXO1 delays skeletal muscle regeneration and suppresses myoblast proliferation // Biosci. Biotechnol. Biochem. 2016. V. 80. P. 1531–1535.

45. *Reed S.A., Sandesara P.B., Senf S.M., Judge A.R.* Inhibition of FoxO transcriptional activity prevents muscle fiber atrophy during cachexia and induces hypertrophy // FASEB J. 2012. V. 26. P. 987–1000.

46. *Belova S.P., Vilchinskaya N.A., Mochalova E.P. et al.* Elevated p70S6K phosphorylation in rat soleus muscle during the early stage of unloading: Causes and consequences // Arch. Biochem. Biophys. 2019. V. 674. e108105.

47. *Hu P., Geles K.G., Paik J.H. et al.* Codependent activators direct myoblast-specific MyoD transcription // Dev. Cell. 2008. V. 15. P. 534–546.

48. *Bois P.R., Grosveld G.C.* FKHR (FOXO1a) is required for myotube fusion of primary mouse myoblasts // EMBO J. 2003. V. 22. P. 1147–1157.

49. *Bianconi V., Mozzetta C.* Epigenetic control of muscle stem cells: time for a new dimension // Trends Genet. 2022.

Поступила 03.02.2022

EFFECT OF SIMULATED GRAVITATIONAL UNLOADING ON M. SOLEUS SATELLITE CELLS

Vilchinskaya N.A.[1], Rozhkov S.V.[1], Komarova M.Yu.[1, 2], Dmitrieva R.B.[2], Shenkman B.S.[1]

[1]Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow
[2]Almazov National Medical Research Center of Ministry of Health of Russia, St.-Petersburg

Markers of the satellite cells terminal differentiation in m. Soleus were analyzed following different periods of gravitational unloading simulated by rats' tail-suspension. Satellite cells were cultivated in vitro. Western blotting was used to determine levels of mTORc1, phospho-p70S6K, phospho-ACC, phospho-FOXO1 and phospho-FOXO3 involved in cells proliferation and differentiation. Desmin and AMPKa1 expression was determined using PCR analysis.

It was shown that 7 and 14 days of tail-suspension lead to the increased intensity of satellite cells proliferation and activities of transcription factors FOXO1 and FOXO3 in rat soleus muscle.

Key words: m. soleus, satellite cells, gravitational unloading, myogenic regulatory factors, desmin, AMPK.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 1. P. 20–29.

УДК 613.693+37.084.2

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ, НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНТЕГРАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АНТИОРТОСТАТИЧЕСКОГО ВЫВЕШИВАНИЯ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ У КРЫС

Лебедева-Георгиевская К.Б.[1], Перевезенцев А.А.[1], Кузнецова О.С.[1], Кудрин В.С.[1, 2], Пикалов В.А.[3], Митрофанова О.В.[1], Масанова А.А.[1], Штемберг А.С.[1]

[1]Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
[2]Научно-исследовательский институт фармакологии им. В.В. Закусова РАМН, Москва
[3]Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино

E-mail: andrei_shtemberg@mail.ru

Проведено исследование молекулярных механизмов нейробиологических эффектов комбинированного воздействия 10-дневного антиортостатического вывешивания (АнОВ), суточного γ-облучения и облучения ионами углерода крыс. Анализ молекулярных изменений в дофаминовых рецепторах гиппокампа выявил изменения у облученных крыс, в частности, обнаружено усиление экспрессии моноаминоксидазы А, субстратами для которой являются серотонин, адреналин, норадреналин и гистамин. Проведено исследование спектральных и амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ крыс после указанных воздействий.

Сравнение первичных результатов ЭЭГ вне зависимости от ритмов выявило тенденции к уменьшению частот первого пика у облученных крыс. У облученных животных наблюдали тенденцию к уменьшению средних частот и амплитуд наиболее выраженного пика спектра ЭЭГ, уменьшению средней частоты и амплитуды в рамках дельта-ритма максимального пика спектра. В поведении крыс наблюдали повышение тревожности и некоторое ускорение обучения в тестах Морриса и условных рефлексов активного избегания в челночной камере, что согласовывалось с изменениями некоторых метаболитов дофамина и серотонина в гиппокампе.

Ключевые слова: антиортостатическое вывешивание, облучение, спектры ЭЭГ, дофаминовые рецепторы, гиппокамп, поведение крыс.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 30–38.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-30-38

Одной из основных проблем при подготовке межпланетных миссий является радиационный барьер – опасность воздействия галактических космических лучей, в состав которых входят тяжелые ионы высоких энергий, вплоть до 10^{20} МэВ. При этом на первый план выходят возможные нарушения в центральной нервной системе (ЦНС) – так называемый эргономический риск, обусловленный возможными нарушениями операторской деятельности космонавтов, связанный с угрозой их жизни непосредственно в процессе полета. Существенные нарушения функций ЦНС при воздействии тяжелых ионов показаны в целом ряде работ [1–4]. Весьма важной и в то же время наименее изученной проблемой являются нейробиологические эффекты комбинированного действия ионизирующих излучений и нерадиационных факторов космического полета (ФКП), важнейшим из которых является микрогравитация. Вместе с тем молекулярные механизмы нейробиологических эффектов комбинированного действия моделируемой микрогравитации и ионизирующих излучений, а также электрофизиологические изменения не изучены. Исходя из этого, задачами настоящей работы было изучение некоторых молекулярных механизмов комбинированного действия АнОВ и ионизирующих излучений, изучение поведения животных и нейрофизиологических, и нейрохимических его коррелят.

Методика

Эксперименты проводили на самцах крыс линии Long Evans массой 150–200 г. В общей сложности было использовано 60 крыс.

При создании АнОВ использовали индивидуальные секции из оргстекла размером 42 х 42 х 40 см, скомпонованные в 2 стеллажа по 15 секций каждый. Животных вывешивали за основание хвоста под углом 30–40° с расчетом снятия статической нагрузки с задних конечностей. Крыс крепили с помощью специальных карабинов, надевающихся на металлический стержень, так чтобы они могли свободно перемещаться в пределах клетки. Создавался антиортостаз, вызывающий перераспределение жидкостей в организме, и снималась статическая нагрузка с задних конечностей. Данная методика – принятая экспериментальная наземная модель невесомости для мелких лабораторных животных.

Стеллажи с вывешенными животными были размещены в облучательской: стеллаж с крысами,

подвергавшимися воздействию и АнОВ и γ-излучения, – в зоне облучения на расстоянии 3,3 м от источника излучения, с таким расчетом, чтобы облучение всех крыс было равномерным. Для облучения использовали установку ГОБО-60 с источником ^{137}Cs (72 г-экв Ra). Эксперимент продолжался суммарно в течение 10 сут: первые 7 сут животные подвергались АнОВ, параллельно были проведены сеансы облучения, моделирующие хроническое облучение, до достижения дозы в 2 Гр. На следующий день после окончания γ -облучения и снятия крыс с вывешивания было проведено однократное облучение головы животных ионами углерода ^{12}C с энергией 420 МэВ в дозе 1 Гр на ускорителе У-70 на базе Института физики высоких энергий (Протвино).

Выбор режима облучения основывался на следующем: суммарная доза 3 Гр для крыс (исходя из их видовой радиочувствительности) примерно соответствует расчетной дозе, которая может быть получена космонавтами в межпланетном полете.

Методы электроэнцефалографических исследований

Для анализа возможных электрофизиологических изменений в работе головного мозга животных крысам была проведена рутинная суммарная запись ЭЭГ. Крысам после облучения, по достижении веса 350–400 г, проводили операцию для вживления интеркраниальных энцефалографических электродов. Животное закреплялось в стереотаксической установке, операция происходила под общим наркозом, (хлоралгидрат 350 мг/кг, концентрация 85 мг/мл). Голова крысы скальпировалась, после чего происходила отчистка и сушка черепа. Электроды представляли собой позолоченные винты диаметром 1,5 мм, закреплялись внутри кости с помощью пластмассы холодной быстрой полимеризации протакрил. Расположение электродов: в области префронтальной коры 2 шт., в области моторной коры 1 шт. и в области лимбической коры 1 шт., референтный и земляной электроды располагались в затылочной кости.

Спустя 5-дневный период адаптации была произведена регистрация ЭЭГ с помощью чипа Neurologger, запись проходила в свободном поведении в домашней клетке в течение 1 ч – с 12.00 до 13.00, все животные записывались в один день, частота оцифровки составила 565 Гц. Регистрация ЭЭГ происходила спустя 5 мес после облучения. Последующая обработка записей проводилась в программах Powergraph3, Excel и Statistica. Полученные записи очищались от артефактов, разделялись в зависимости от физиологического состояния животного, после чего резались на отрезки от 7 до 10 с. Из полученных отрезков проводили построение спектров мощности и амплитуды. Значения амплитуды и частот спектра сохранялись для программы Excel, после чего статистически и математически обрабатывались. В итоге по каждому из отрезков был построен спектр мощности с определением амплитудно-частотных характеристик по 2 наиболее выраженным пикам. Был произведен общий анализ средних амплитуд и частот для определения наличия тенденций каналов префронтальной коры. Последующий анализ проводился в рамках диапазонов основных ритмов. Анализировались средние частоты и амплитуды в рамках дельта- (1–4 Гц), тета- (5–7 Гц) и альфа- (8–12 Гц) ритмов.

Всего было прооперировано и записано 15 животных, в связи с техническими особенностями работы чипов Neurologger пригодными для описания оказались 7 записей, 3 контрольных и 4 экспериментальных животных. Анализировались значения, полученные для префронтальной коры как наиболее важной для реализации высших когнитивных функций.

Для оценки достоверности результатов был применен непараметрический критерий Уилкоксона.

Методы исследования поведения животных

Животные были изначально разделены на группы «контроль» (n = 8) и «вывешивание + облучение» (она же «опыт») (n = 8), также для исследования эффектов отдельных воздействий были введены группы «вывешивание» (n = 7) и «облучение» (n = 7). В данной работе внимание уделяется группам «контроль» и «опыт». Поведенческие тесты начинались на 2-й день после завершения воздействий.

Тестирование в приподнятом крестообразном лабиринте (ПКЛ)

Приподнятый крестообразный лабиринт является общепринятым тестом для оценки тревожности экспериментальных животных. Критерием тревожности служит количество выходов в открытый отсек лабиринта и время пребывания в нем.

Использовалась стандартная крестообразная установка размахом 1,5 м, 2 противоположных рукава которой закрыты по бокам черными стенками высотой 50 см. Установка расположена на высоте 70 см от пола, что исключает побег животного. Крыса первоначально высаживается в темный рукав. Тест проводится на протяжении 2 мин, в ходе которых регистрируются число перебежек между темными рукавами, латентный период выхода в светлый рукав, количество выходов и общее время, проведенное в светлом рукаве.

Водный тест Морриса

Водный тест (лабиринт) Морриса предназначен для исследования пространственной памяти и ориентации животных. Подробно методика была описана в предыдущих публикациях [5].

Использовалась стандартная установка диаметром 150 см, расположенная в полузатемненной комнате с освещением по периметру, что исключало наличие ярко выраженных ориентиров. Испытание записывалось на видео для последующей обработки в ПО Bonsai (Open Ephys, США), определяющем временные характеристики прохождения теста, скорость, манеру поведения крысы.

Условные рефлексы активного избегания (УРАИ) в челночной камере

Использовали челночную камеру размером 9 х 60 см и высотой 30 см, разделенную перегородкой на 2 одинаковых отсека с независимым электрополом. Перегородка имела прямоугольное отверстие шириной 8 см и 6 см в высоту с управляемой извне дверцей, сдвигаемой вдоль плоскости проема. В съемную крышку камеры вмонтированы 2 независимые лампы, располагающиеся (при закрытой крышке) по центру отсеков. Животное помешали в одну из камер при закрытой дверце между отсеками и выключенным освещением. Камеру закрывали крышкой, после чего дверцу между отсеками открывали. Выемка животного проводилась в обратном порядке. Тест начинали с включения светового сигнала в отсеке, где находилась крыса. Через 6 с на электропол подавали электрошоковый стимул (0,5 мА, 100 Гц, меандр) до тех пор, пока крыса не переходила в другой отсек. Пауза между сочетаниями составляла 10 с. Затем такую последовательность действий повторяли установленное число раз, что составляло один сеанс обучения. В случае перехода животного раньше 6 с срока освещение сразу же выключали, электропол не активировали, что считалось правильной реакцией (реакция избегания). Проводили по одному сеансу обучения в сутки: первый состоял из 5 сочетаний, последующие – из 20.

Молекулярные и нейрохимические исследования

Для исследования нейрохимических и молекулярных изменений был выбран гиппокамп, исходя из следующих соображений. Во-первых, эта структура является основной мишенью для ионизирующих излучений в силу того, что в субгранулярной зоне зубчатой извилины гиппокампа находится основная зона нейрогенеза. Кроме того, гиппокамп играет важную роль в формировании пространственного поведения и памяти, являющихся важным элементом операторской деятельности. Животные групп «контроль» (n = 8) и «опыт» (n = 8) подвергались эвтаназии путем декапитации. Для последующего изучения гиппокамп отделяли от других структур головного мозга. Образцы гомогенизировали в 0,1М-хлорной кислоте (1:20) с 0,5 мкм 3,4-дигидроксибензойной кислотой в качестве внутреннего стандарта и центрифугировали при 12 000 g в течение 10 мин. Супернатант анализировали с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с электрохимической детекцией.

Тотальную РНК экстрагировали, используя Тризол (Evrogen, Россия) и стандартный хлороформный фенол. Обратная транскрипция выполнялась набором MMLV RT со случайным гексамером, для определения использовались заранее подобранные праймеры (Evrogen, Россия) по инструкции производителя, комплект manual. Уровни экспрессии генов анализировали с помощью qRT-ПЦР. qPCRmix-HS SYBR (Evrogen, Россия) был добавлен к соответствующим образцам кДНК и праймеров.

Анализ уровня экспрессии генов был выполнен с помощью метода qRT-PCR. К qPCRmix-HS SYBR (Евроген, Россия) добавляли необходимое количество анализируемой кДНК и праймеров. В работе был использован термоциклер BioRad CFX96

Таблица

Нуклеотидные последовательности праймеров, используемых для qRT-PCR

Genes	Primers	
	Forward	Reverse
β-Actin	5′- cactgccgcatcctcttcct-3′	5′- aaccgctcattgccgatagtg-3′
Catechol-O-methyltransferase (COMT)	5′-cacctactgcacacagaaggaat-3′	5′-agtagccacagtaagctcccagt-3′
Dopamine receptor 1 (D1)	5′-cttcgatgtgtttgtgtggttt-3′	5′-tcttccttcttcaggtcctcag-3′
Dopamine receptor 2 (D2)	5′-cttgatagtcagccttgctgtg-3′	5′- agggcacgtagaatgagacaat-3′
Dopamine transporter (DAT)	5′-aatgctccgtgggaccaatg-3′	5′-caataaccatgaagagcagg-3′
Monoamine oxidase A (MAO-A)	5′-gccaggaacggaaatttgta-3′	5′-tctcaggtggaagctctggt-3′
Serotonin receptor 1a (5-HT1a)	5′- gatctcgctcacttggctca-3′	5′-accttcctgacagtcttgcg-3′
Serotonin receptor 2a (5-HT2a)	5′-caccgacatgcctctccatt-3′	5′-ggacacaggcatgacaagga-3′
Serotonin receptor 2c (5-HT2c)	5′-atttgtgccccgtctggatt-3′	5′-gctttcgtccctcagtccaa-3′
Serotonin transporter (SERT)	5′- atgctaccagaatggcggag-3′	5′-gcccaggctatgatggtgtt -3′
Tyrosine hydroxylase (TH)	5′-tcggaagctgattgcagaga-3′	5′-ttccgctgtgtattccacatg-3′

(Bio-Rad Laboratories, США). Изменение экспрессии целевых генов было определено методом $2^{-\Delta\Delta CT}$ с использованием β-актина как референтного гена для всех образцов. Последовательности используемых праймеров приведены в таблице.

Программа эксперимента была утверждена Комиссией по биоэтике ГНЦ РФ – ИМБП РАН.

Статистическая обработка данных

Данные представлены как среднее ± S.E.M. Стандартная обработка данных была проведена с использованием программы Statistica 10 (StatSoft Inc., США). Внутригрупповое обучение в тесте выработки рефлекса пассивного избегания было проанализировано с помощью t-теста Стьюдента для зависимых выборок. Другие данные были проанализированы с помощью однофакторного дисперсионного анализа (One-Way ANOVA) и post hoc критерий Дункана был рассчитан там, где были обнаружены различия дисперсий.

Для оценки достоверности применен непараметрический критерий Уилкоксона.

Результаты и обсуждение

Исследование поведения животных

Результаты тестирования животных в приподнятом крестообразном лабиринте (ПКЛ) свидетельствуют о существенном повышении тревожности крыс экспериментальной группы. Эти животные продемонстрировали статистически значимое увеличение латентного периода выхода в открытый участок ПКЛ (рис. 1, А), значительное снижение времени пребывания в нем (см. рис. 1, Б), а также еще более значительное (более чем в 2 раза) сокращение числа выходов в открытый отсек ПКЛ по сравнению с животными контрольной группы (см. рис. 1, В).

Результаты обучения животных в водном тесте Морриса представлены на рис. 2. Как контрольные, так и подопытные крысы показали достаточно высокоэффективное обучение. В то же время, лишь в некоторые дни обучения было выявлено статистически значимое влияние облучения: день 2-й ($F = 13,3$; $p = 0,0005$), день 4-й ($F = 8$; $p = 0,009$), день 5-й ($F = 8,4$; $p = 0,007$).

На 2-й день тестирования подопытные крысы показали меньшее время поиска платформы на 40 % ($p = 0,006$) по сравнению с контролем. На 4-й и 5-й день обучения крысы экспериментальной группы также демонстрировали сокращение времени поиска платформы на 31 % ($p = 0,03$) и на 36 % ($p = 0,03$) соответственно в сравнении с контрольными животными.

Экспериментальные воздействия привели к увеличению тревожности животных и в то же время к улучшению их обучения в тесте Морриса

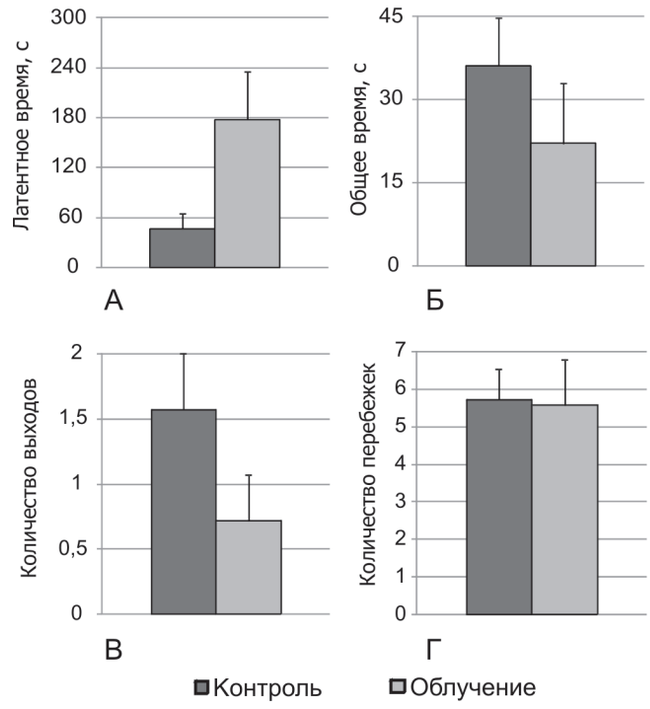


Рис. 1. Поведение крыс экспериментальных групп в приподнятом крестообразном лабиринте.
Данные представлены как среднее + S.E.M: А – латентное время выхода в неогороженный рукав лабиринта; Б – общее время пребывания в неогороженном рукаве лабиринта; В – число выходов в неогороженный рукав лабиринта; Г – число перебежек между противоположными огороженными рукавами лабиринта. * – статистически значимые разтличия внутри временных интервалов тестирования: * – $p < 0,05$

– гиппокамп-зависимой форме поведения, связанной с пространственной ориентацией и памятью. Видимо, это связано с повышением возбудимости животных, подвергшихся облучению в небольших дозах, неоднократно показанным в ряде работ [6, 7].

Эти результаты согласовывались с результатами обучения крыс в тесте УРАИ в челночной камере. Подопытные животные опережали контрольных в течение всего процесса обучения (рис. 3).

Эффект улучшения условно-рефлекторной деятельности после облучения известен достаточно давно и показан как на крысах [8], так и на обезьянах [9]. Причины его до сих пор окончательно не выяснены. Есть предположение, что, с одной стороны, это может объясняться так называемым эффектом сужения внимания – подавлением исполнительных механизмов ориентировочной реакции в ретикулярной формации и таламусе, в результате чего животные меньше отвлекаются на посторонние раздражители; с другой стороны, может иметь место активизация компенсаторных процессов в ЦНС, вызванная облучением на первом этапе лучевой реакции.

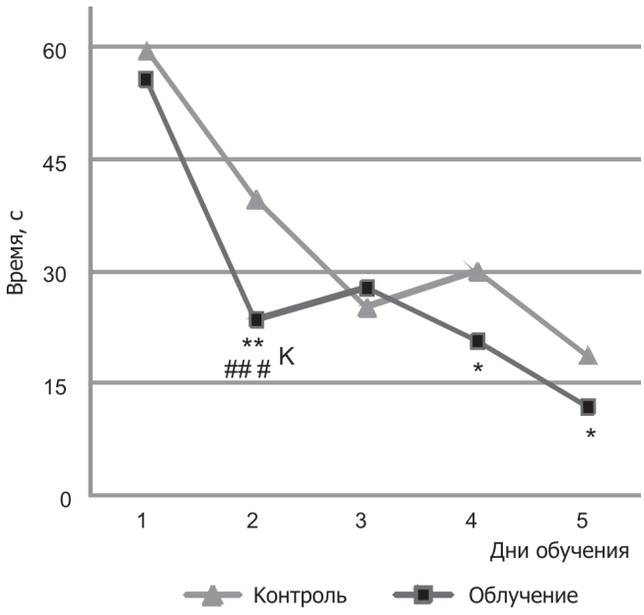


Рис. 2. Поведение крыс экспериментальных групп в водном лабиринте Морриса.
Представлены кривые средних значений за день обучения. * – статистически значимые различия внутри временных интервалов тестирования: * – p < 0,05; ** – p < 0,01; # – статистически значимые различия между группами в разных временных интервалах тестирования, а надстрочный индекс указывает, в отношении какой группы животных было проведено сравнение: # – p < 0,05; ### – p < 0,001

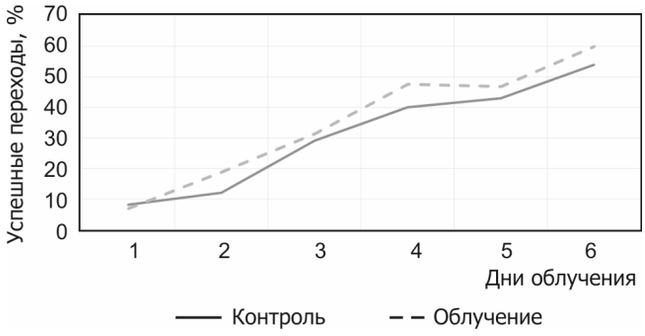


Рис. 3. Результаты обучения крыс в челночной камере.
По оси абсцисс – % реакций избавления

Исследование спектральных и амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ крыс после 10-суточного комбинированного воздействия АнОВ и суточного γ-облучения и облучения головы ионами углерода

Сравнение результатов было проведено по 4 контрольным и 3 облученным животным. При визуальном анализе записей первого канала (префронтальная кора) существенных различий выявлено не было, у 1 контрольного животного был обнаружен малый абсансный приступ, удаленный из анализа в качестве артефакта. После обработки рутинных записей ЭЭГ был проведен первичный анализ по характеристикам частот и амплитуд для представления распределения по ритмам и грубого выяснения возможного смещения в сторону доминирования определенного ритма.

Исходя из проведенного анализа, наблюдается статистически незначимая тенденция к уменьшению частот и амплитуд первого пика у облученных крыс по сравнению с контрольными.

После определения изменений и общих тенденций спектров записей ЭЭГ был проведен анализ частот и амплитуд в рамках основных диапазонов ЭЭГ крыс. На рис. 4 представлено сравнение амплитудно-частотных характеристик максимального пика в области дельта-ритма (1–4 Гц).

Исходя из проведенного анализа, следует, что статистически значимо снижается частота ($p = 0,04$) и амплитуда ($p = 0,05$) в области дельта-ритма в префронтальной коре у облученных животных.

При оценке амплитудно-частотных характеристик максимального пика в области тета-ритма (5–7 Гц) наблюдались менее существенные тенденции, которые заключаются в незначительном смещении частот к более высоким значениям у облученных животных.

Анализ изменений второго по величине пика спектра мощности не показал существенных различий как в области дельта-, так и в области тета-ритмов (рис. 5).

Несмотря на то что визуально присутствовали определенные тенденции изменений, какого-либо статистического подтверждения их не было получено, что может быть связано как с нечувствительностью второго пика к данным воздействиям, так и с индивидуальными особенностями животных.

Таким образом, у облученных животных наблюдается тенденция к уменьшению средних частот и амплитуд наиболее выраженного пика спектра ЭЭГ в области дельта-ритма.

Для анализа доминирования определенного ритма было оценено процентное соотношение записей с пиками в области основных ритмов к общему числу записей.

Стоит отметить, что далеко не у всех животных удалось зафиксировать альфа-ритм. Это может быть связано как с особенностями записи, поскольку регистрация происходила во время активного состояния животных, так и с малой выборкой. При анализе распределения ритмов были получены следующие зависимости. На рис. 6 представлены результаты сравнения распределения альфа, тета- и дельта-ритмов у крыс, у которых присутствовал альфа-ритм. Так как и в анализе распределения участвуют 4 животных, статистические данные в иллюстрации не приводятся. Данный анализ показывает исключительно предполагаемые тенденции

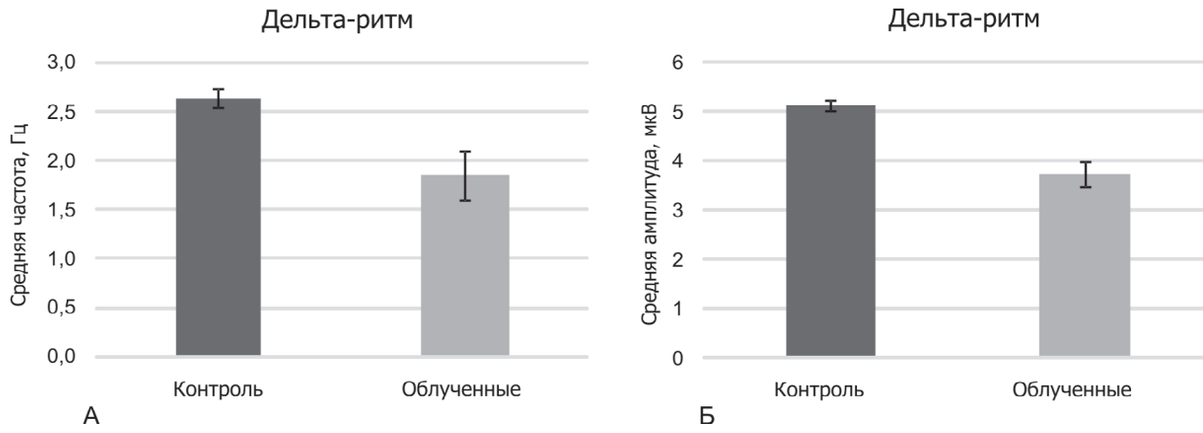


Рис. 4. Сравнение амплитудно-частотных характеристик максимального пика в области дельта-ритма (1–4 Гц); $p < 0,05$. 1-й канал.
А – частотные характеристики; Б – амплитудные характеристики

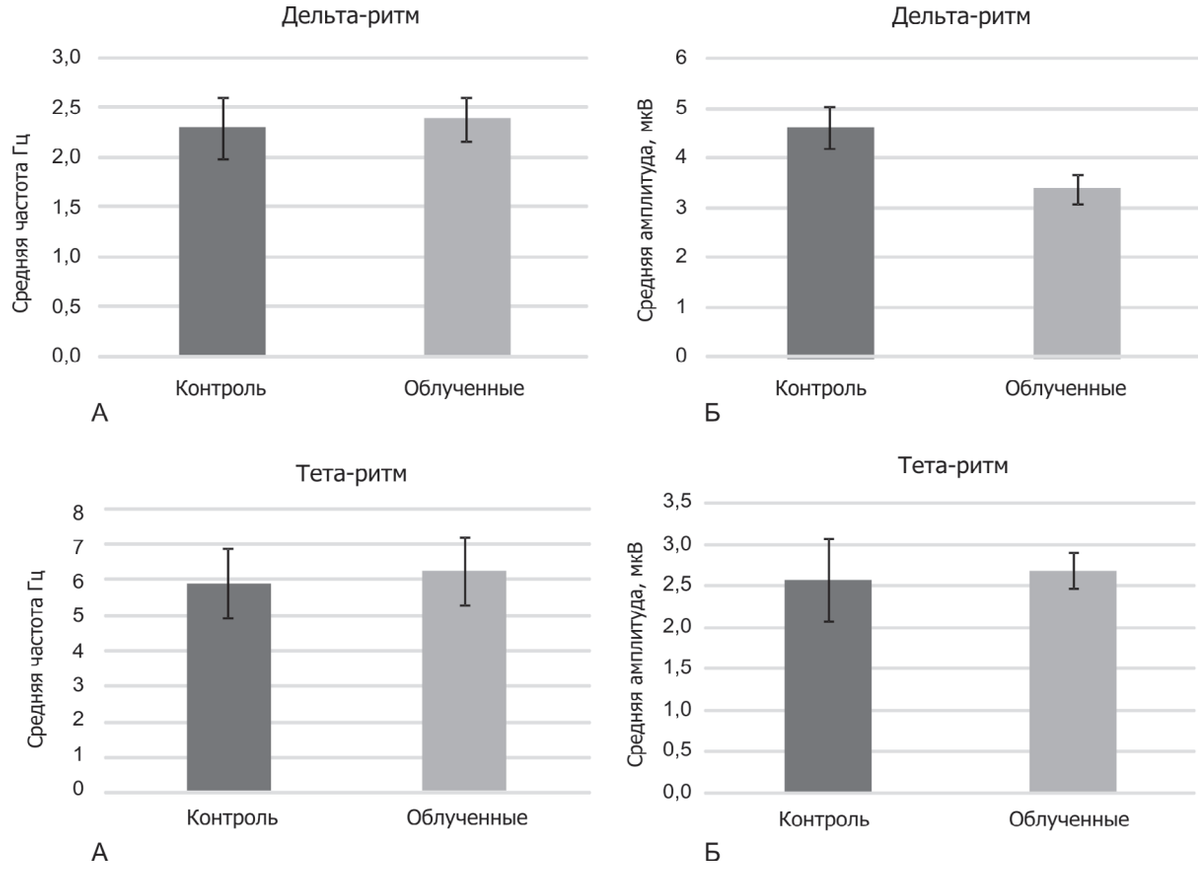


Рис. 5. Сравнение амплитудно-частотных характеристик второго по величине пик в области дельта-ритма (1–4 Гц) и тета-ритма (5–7 Гц). 1-й канал

для последующего более длительного фиксирования и анализа записей.

Исходя из проведенного анализа, следует отметить тенденцию к доминированию тета-ритма по сравнению с другими ритмами у контрольных животных, при этом облученные животные демонстрируют более равномерное распределение ритмов в зависимости от времени. Это может быть связано как с функциональными особенностями организма, так и с реакцией на облучение.

При сравнении распределения ритмов у животных с наличием альфа-ритма и без него следует

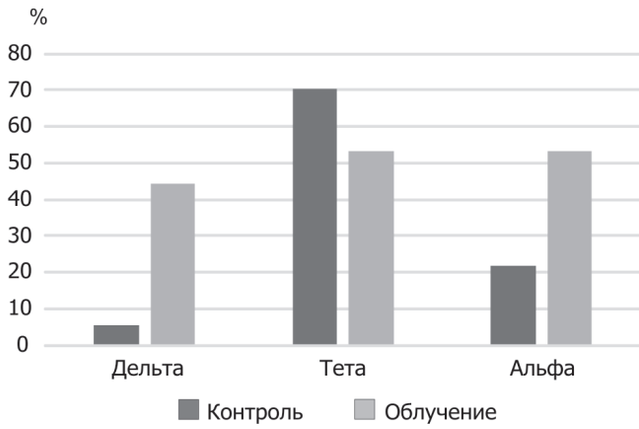


Рис. 6. Пример сравнения доминирования ритмов у контрольных и облученных животных, у которых был детектирован альфа-ритм

отметить разнонаправленность изменений. Как было указано выше, у животных с наличием альфа-ритма есть тенденция к доминированию тета-ритма по сравнению с другими ритмами у контрольных животных. Животные, у которых альфа-ритм практически отсутствовал, демонстрировали тенденции к доминированию тета-ритма как в контроле, так и у облученных животных. Различия в процентных соотношениях ритмов у облученных животных были более существенны. Поскольку доминирование тета-ритма свидетельствует об активном состоянии животного во время бодрствования, можно предполагать более существенные процессы возбуждения у облученных животных, что согласуется с данными о поведении и нейрохимическими изменениями. Статистические различия, связанные с уменьшением амплитуды дельта-ритма, также могут свидетельствовать об усилении процессов возбуждения.

Результаты облученных и необлученных животных, полученные при анализе записей второго канала, расположенного также в префронтальной коре, не показали существенных различий.

Исследование нейрохимических изменений в гиппокампе крыс, подвергнутых комбинированному воздействию АнОВ, γ-облучения и облучения ионами углерода ^{12}C

Несмотря на то что статистически значимых изменений в концентрациях моноаминов не были получены, у крыс, подвергнутых комбинированному воздействию АнОВ и облучения, повысились концентрации метаболитов как дофамина (гомованилиновой кислоты – ГВК), так и серотонина (5-оксииндолуксусной кислоты – 5-ОИУК) (рис. 7). Эти данные согласуются с результатами исследования молекулярных изменений в гиппокампе и результатами исследования поведенческих и

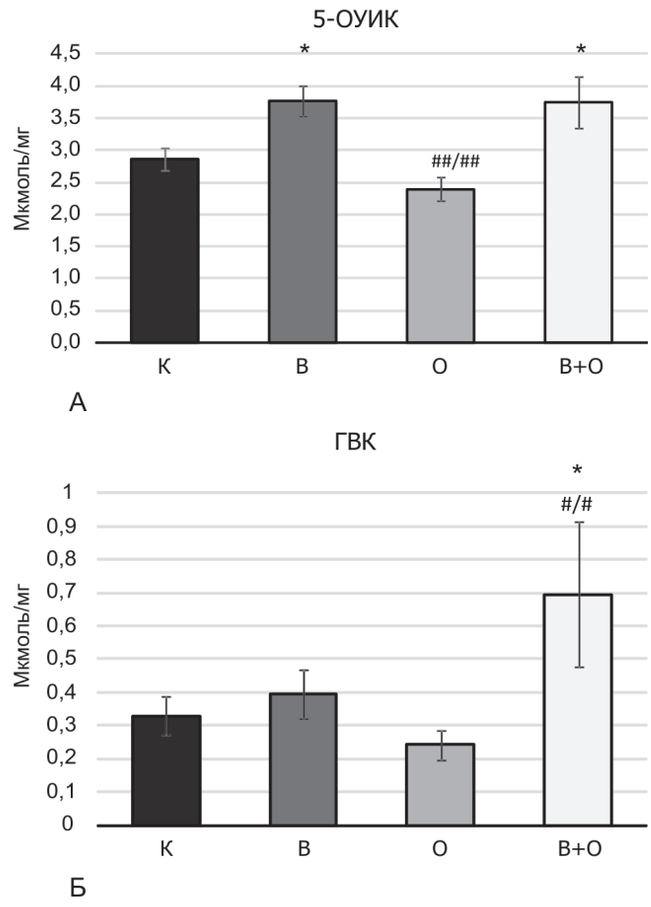


Рис. 7. Концентрация метаболитов дофамина (ГВК – гомованилиновая кислота) и серотонина (5-ОИУК – 5-оксииндолуксусная кислота) в гиппокампе крыс экспериментальных групп

нейрофизиологических исследований, особенно с результатами обучения в тесте Морриса как гиппокамп-зависимой формы поведения. Наиболее существенные изменения коснулись дофаминергической системы, что согласуется с результатами наших предыдущих исследований [5].

Исследование молекулярных механизмов нейробиологических изменений в гиппокампе крыс, подвергнутых комбинированному воздействию АнОВ, γ-облучения и облучения ионами углерода ^{12}C

Изучены концентрации белков, соответствующих основным агентам дофаминэргической системы: D1, D2-рецепторам, DAT и MAO.

При анализе молекулярных изменений в гиппокампе было показано повышение экспрессии генов, связанных с дофаминовыми рецепторами, у крыс, подвергшихся экспериментальным воздействиям, однако зарегистрированные различия были недостоверны. Соответствующие данные представлены на рис. 8.

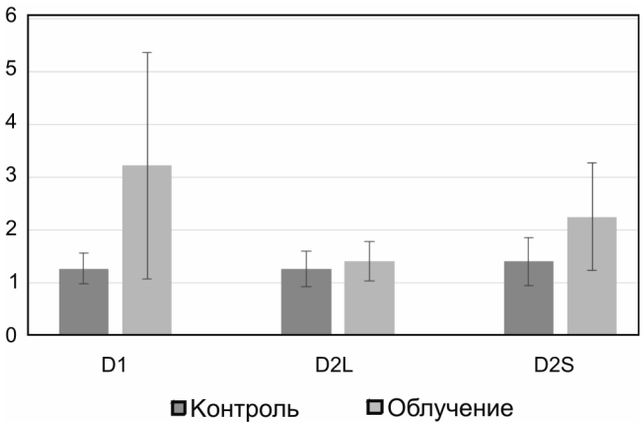


Рис. 8. Экспрессия генов, связанных с рецепторами дофамина

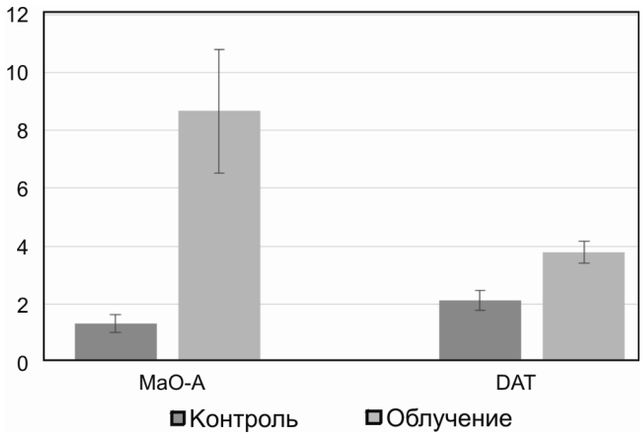


Рис. 9. Изменение экспрессии генов, связанных с транспортом и метаболизмом моноаминов ($p < 0,05$)

Вместе с тем у облученных животных выявлено значимое повышение экспресиии генов, связанных с транспортом и метаболизмом моноаминов, в частности МАО-А, одного из двух генов, кодирующих митохондриальные ферменты, которые катализируют окислительный процесс, связанный с процессами дезаминирования аминов (рис. 9). Изоформа моноаминоксидазы А связана в первую очередь с серотонином, адреналином, норадреналином и гистамином. Учитывая полученные данные, в последующий анализ имеет смысл включить экспрессию содержания моноаминоксидазы В, в большей степени связанной с дезаминированием дофамина.

На грани значимых изменений происходит увеличение переносчика дофамина, что коррелирует с полученными в другом цикле исследований данными об отсутствии повышения концентрации дофамина в гиппокампе и одновременном повышении концентрации метаболитов дофамина, позволяющими предполагать активизацию метаболизма дофамина у облученных животных.

Выводы

1. Анализ молекулярных изменений в дофаминовых рецепторах гиппокампа выявил изменения у облученных крыс; в частности, у облученных животных обнаружено усиление экспрессии моноаминоксидазы А, субстратами для которой являются серотонин, адреналин, норадреналин и гистамин.
2. Выявлены тенденции к уменьшению частот первого пика ЭЭГ у крыс, подвергнутых экспериментальным воздействиям и средних частот и амплитуд наиболее выраженного пика спектра ЭЭГ, а также к уменьшению средней частоты и амплитуды в рамках дельта-ритма максимального пика спектра.
3. В поведении крыс экспериментальной группы наблюдалось повышение тревожности и некоторое ускорение обучения в тестах Морриса и УРАИ.
4. Обнаружено некоторое повышение метаболитов как дофамина, так и серотонина в гиппокампе крыс, подвергнутых экспериментальным воздействиям.

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН 65.2.

Список литературы

1. *Rabin B.M., Joseph J.A., Shukitt-Hale B.* Heavy particle irradiation, neurochemistry and behavior: threshold, dose-response curves and recovery of function // Adv. Space Res. 2004. № 33. P. 1330–1333.
2. *Rabin B.M., Joseph J.A., Shukitt-Hale B.* A longitudinal study of operant responding in rats irradiated when 2 months old // Radiat. Res. 2005. № 64.
3. *Britten R.A., Davis L.K., Johnson A.M. et al.* Low (2 cGy) doses of 1 GeV/u ^{56}Fe-particle radiation loads to a persistant reduction in the spatial learning ability of rats // Radiat. Res. 2012. № 177. P. 146–151.
4. *Machida M., Lonart G., Britten A.* Low (60 cGy) doses of ^{56}Fe HZE-particle radiation lead to a persistent reduction in the glutamatergic readily releasable pool in rat hippocampal synaptosomes // Radiat. Res. 2010. № 174. P. 618.
5. *Ushakov I.B., Shtemberg A.S., Krasavin E.A. et al.* Effects of space radiation and combined impact of radiation and other spaceflight factors on CNS in model experiments on animals // Biol. Bull. Rev., 2019. № 9. P. 93–104.
6. *Pecaut M.J., Haerich P., Zuccarelli C.N. et al.* Behavioral consequences of radiation exposure to simulated space radiation in the C57Bl/6 mouse: open field, rotarod, and acoustic startle // Cognitive, Affective and Behavioral Neurosci. 2002. V. 2. № 4. P. 329.
7. *Blair W.C.* The effects of cranial X-irradiation on maze acquisition in rats // J. Compar. and Physiol. Psychol. 1958. V. 54. № 2. P. 175–178.
8. *Harlow H.F., Scrier A.M., Simons D.G.* Exposure of primates by cosmic radiation above 90000 feet // J. Compar. and Physiol. Psychol. 1956. V. 49. № 2. P. 195–200.

9. *Riopelle A.J., Gronsky M.A., Ades H.W*. Learned performance of monkeys after single and repeated X-irradiation // J. Compar. and Physiol. Psychol. 1956. V. 49. № 5. P. 521–524.

Поступила 25.08.2021

MOLECULAR, NEUROPHYSIOLOGICAL AND INTEGRATIVE EFFECTS OF THE COMBINED EXPOSURE TO TAIL-SUSPENSION AND IONIZING RADIATION IN RATS

Lebedeva-Georgievskaya K.B.[1], Perevezentsev A.A.[1], Kuznetsova O.S.[1], Kudrin V.S.[1, 2], Pikalov V.A.[3], Mitrofanova O.V.[1], Masanova A.A.[1], Shtemberg A.S.[1]

[1]State Scientific Center of the Russian Federation-Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow
[2]Zakusov Research Institute of Pharmacology of the Russian Academy of Medical Sciences, Moscow
[3]Institute of High Energy Physics A.A.Logunov of NRC «Kurchatov Institute», Protvino

Molecular mechanisms of the neurobiological effects of 10-d suspension combined with daily exposure to γ-radiation and carbon ions were studied in rats. Analysis of the molecular changes in hippocamp dopamine receptors revealed changes in irradiated rats including, specifically, intensive expression of monoamine oxidase A, substrates for which are serotonin, adrenalin, noradrenaline and histamine. The EEG spectral and amplitude-frequency characteristics were analyzed.

Comparison of primary EEG data regardless of rhythms brought to light a downward trend in the alpha frequencies. A similar trend was observed in the center frequencies and amplitudes of the most expressed peak, and the center frequency and amplitude of the delta highest peak. More anxious behavior and a somewhat quicker learning to fulfill the Morris tests and conditioned response of active avoidance in the shuttle chamber were in harmony with changes in metabolites of hippocamp dopamine and serotonin.

Key words: tail-suspension, irradiation, EEG spectra, dopamine receptors, hippocamp, rats' behavior.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 30–38.

УДК 613.693

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕТОВ В РЕЖИМЕ СВЕРХМАНЕВРЕННОСТИ

Зацепилин А.В., Хоменко М.Н., Филатов В.Н., Чистов С.Д., Симухин В.В., Кисляков Ю.Ю.

Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва

E-mail: chistov388@yandex.ru

По материалам объективного контроля полетов в режиме сверхманевренности определены параметры действующих ускорений и перегрузок. Проведен опрос летного состава по специально разработанной анкете, касающейся психофизиологических факторов сверхманевренности. Обоснованы методы психофизиологической подготовки летчиков.

Ключевые слова: сверхманевренность, перегрузка, ускорение, ориентировка, индикация, психофизиологическая подготовка.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 39–45.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-39-45

Одним из важных условий эффективности такого сложного вида профессиональной деятельности, как летная, требующая высокого совершенства сенсорных, мыслительных и моторных процессов, эмоционально-волевой устойчивости, развитых профессионально важных психофизиологических и специальных физических качеств, является психофизиологическая подготовка летчиков.

Актуальность проблемы определяется все возрастающими требованиями к человеку, управляющему современной авиационной техникой. В свою очередь, его возможности все больше зависят от специальной тренированности и подготовленности.

Современная российская концепция истребителя пятого поколения, в основе которой лежат принципы кардинального повышения маневренных характеристик (расширение допустимого диапазона углов атаки истребителя свыше 90° и увеличение угловой скорости тангажа до 70–80°/с) в сочетании со сверхзвуковой крейсерской скоростью полета и существенным снижением радиолокационной и тепловой заметности, обусловила появление такого свойства истребителей, как сверхманевренность, которое потенциально расширяет области возможного применения авиационных комплексов в 1,5–2 раза [1].

Сверхманевренность определяется как свойство летательного аппарата сохранять устойчивость и управляемость при полете на закритических значениях угла атаки и с изменением положения самолета относительно воздушного потока. Данным свойством обладает ряд современных авиационных комплексов, оснащенных силовыми установками с отклоняемым вектором тяги.

Повышение характеристик авиационного комплекса ограничено пределами психофизиологических возможностей человека. Достижение высоких профессиональных качеств летным составом, как показал опыт исследований, проведенных специалистами в области авиационной медицины, находится в прямой зависимости от уровня профессионального здоровья летчиков, их знаний о своих психофизиологических возможностях и ограничениях.

Специфические условия среды профессиональной деятельности летного состава на фоне меняющихся условий оказывают выраженное влияние на функциональное состояние, уровень профессиональной работоспособности и величину психофизиологических резервов [2].

Психофизиологическая подготовка летного состава направлена на формирование и поддержание его профессиональной и функциональной надежности в различных условиях деятельности. Надежность летчика обеспечивается психологической готовностью, натренированностью физиологических систем, развитием профессионально важных качеств [3].

Подготовка летчика к выполнению полетов в режиме сверхманевренности (РСМ) должна включать, наряду с обучением и тренажной подготовкой, мероприятия психофизиологической подготовки, которые обеспечат надежность пространственной ориентировки, готовность и устойчивость летчика к действию перегрузок, изменению темпа и структуры деятельности по управлению самолетом.

Цель исследования: определение психофизиологических особенностей сверхманевренных полетов и обоснование методов психофизиологической подготовки летного состава к ним, требований к индикации параметров полета.

Методика

Проанализированы материалы объективного контроля 55 полетов на самолете Су-30СМ при выполнении маневров в РСМ и обычном режиме. С целью оценки воздействия динамического фактора полета исследовали характеристики перегрузок и угловых скоростей по материалам объективного контроля. Для оценки особенностей профессиональной деятельности исследовали амплитудно-частотные характеристики управляющих воздействий летчика (УВЛ) на ручку управления самолетом (РУС).

Анализ объективного контроля проводился методом автоматизированного поиска максимумов нормальной перегрузки и отбора максимальных значений продольной и боковой перегрузки, угловых скоростей вокруг 3 осей, приборной скорости и угла атаки на отрезках длительностью 20 с (по 10 с вправо и влево от каждого пика нормальной перегрузки). Для выполнения анализа было разработано специальное программное обеспечение, выполняющее автоматический поиск максимумов нормальной перегрузки и формирующее отрезки для анализа.

С учетом результатов исследований, свидетельствующих о преимущественном риске потери пространственной ориентировки в РСМ [4], была разработана специальная анкета по психофизиологическим аспектам выполнения полетов в РСМ. Анкета включает в себя общий опрос о возникающих неблагоприятных состояниях, более подробный опрос об иллюзиях пространственного положения и пространственной дезориентации, особенности индикации параметров полета, способах преодоления неблагоприятных состояний, методах психофизиологической подготовки летного состава.

С применением анкет было опрошено 38 летчиков, из которых 15 человек летали на Су-30СМ, 11 человек – на Су-35, 8 человек освоили 2 типа самолетов и летали на Су-30СМ и Су-35, 4 летчика освоили три типа самолетов и летали на Су-30СМ, Су-35 и Су-57. Общий налет составил в среднем 1978 ± 622 ч. Стаж летной работы составил в среднем 24 ± 9 лет.

Структурный анализ УВЛ в поперечном и продольном каналах РУС выполнялся программным способом на основе математико-статистического метода [5], основанного на отнесении каждого УВЛ к группе рабочих (собственно управляющих), корригирующих и фоновых движений. Производился расчет их частоты (количество движений за 1 мин) и средней амплитуды (мм).

Результаты и обсуждение

В результате исследований и проведенных летных испытаний в РСМ определены допустимые области маневрирования самолета. В данных областях могут быть выделены 4 характерных подобласти режимов полета, в которых существует возможность практической реализации новых видов движения, несвойственных для самолетов четвертого поколения [1]:

I. Выполнение режимов в диапазоне докритических углов атаки 24–35°.

II. Подобласть форсированных режимов, углы атаки 25–45°.

III. Подобласть управляемых маневров на закритических углах атаки 60–90°.

IV. Подобласть околонулевых скоростей полета.

Освоение РСМ летным составом следует начинать с выполнения полетов с углом атаки $\alpha \leq 45°$ и без скольжения, которые относятся к подобластям режимов в диапазоне докритических углов атаки 24–35° (I) и форсированных режимов с углами атаки 25–45° (II). В указанных областях характер движения самолета близок к традиционной аэродинамике, что не требует от летчиков кардинальной перестройки стереотипа деятельности и в то же время обеспечивает значительное повышение маневренности в воздушном бою. Кроме того, в них практически отсутствует боковая составляющая перегрузки, а нормальная перегрузка значительно превышает продольную, что обеспечивает в некоторой степени привычное для летчиков направление результирующего вектора перегрузки и соответственно в меньшей степени влияет на вероятность пространственной дезориентации.

Однако даже в подобластях I и II РСМ имеются значительные отличия в пилотировании самолета от обычного режима. В РСМ на летчика действует более динамичный профиль перегрузок и угловых ускорений. При полетах на докритических углах атаки предельные отклонения РУС по крену и тангажу используются редко и непродолжительно по времени, тогда как в РСМ выполняются частые и длительные по времени (в сравнении с обычным маневрированием) предельные отклонения РУС по крену и тангажу, а также педалей. По сути дела, летчик эксплуатирует два самолета в одном, один – скоростной, высокоманевренный, другой – не скоростной, сверхманевренный. Включение летчиком кнопки «Маневр» на РУС является для него сигналом для смены стереотипа деятельности.

Все маневры в исследованных полетах выполнялись в подобластях I и II РСМ, при значениях угла атаки не более 39°. Отрицательные нормальные перегрузки в исследованных полетах практически отсутствовали.

Сравнительный анализ профилей перегрузок в обычном режиме и РСМ позволил установить, что средние значения пилотажной перегрузки (n_y) в РСМ превышают аналогичные значения в обычном режиме на 24 %. Диапазон значений нормальной перегрузки в исследованных полетах составил

2–7 ед., что соответствует маневрированию в обычном режиме. Полученные значения продольной перегрузки (n_x) в РСМ превысили аналогичные величины в обычном режиме в 2 раза. Положительная продольная перегрузка составляла в среднем 0,7–1,4 ед. Отрицательные значения практически не наблюдались. Полученные значения боковой перегрузки (n_z) в РСМ превысили аналогичные величины в обычном режиме на 40 %. Боковая перегрузка составляла в среднем 0,1 ед. и максимально достигала 0,5 ед.

Пилотажные перегрузки в РСМ носят кратковременный характер, что снижает риск гемодинамических эффектов (нарушение зрения, потеря сознания). Увеличение градиентов перегрузок и их частая смена в РСМ могут, во-первых, приводить к «пуш-пул»-эффекту [6], во-вторых, существенно усложнять пространственную ориентировку летчика.

Самолет Су-30СМ оснащен комплектом кислородного оборудования ККО-15ЛП серии 2, предназначенным для создания необходимых условий жизнедеятельности летчика и повышения комфортности. Автомат давления АД-15 кислородно-дыхательной аппаратуры КДА-15 предназначен для создания в пневмоманжетах и камерах противоперегрузочного костюма ППК-3-120 компенсирующего давления, обеспечивающего увеличение предела переносимости перегрузок при эволюциях самолета до 9 ед. и скорости нарастания перегрузок до 1,5 ед./с. При действии перегрузок автомат создает избыточное давление под маской независимо от фазы дыхания.

Противоперегрузочный костюм ППК-3Р-120 предназначен для летного состава оперативно-тактической авиации и является средством, повышающим предел переносимости перегрузок в направлении «голова – таз». При действии перегрузок костюм ППК, обжимая переднюю стенку живота и мышечные группы нижних конечностей, препятствует перемещению крови в нижние части тела, чем улучшает кровообращение головы и туловища. Брюшная камера, создавая давление на переднюю стенку живота, фиксирует в определенном положении внутренние органы, предохраняя их от смещения и растяжения. Воздух в камеру ППК подается через автомат давления, который создает в ней избыточное давление в зависимости от величины действующей перегрузки. При уменьшении перегрузки стравливание воздуха из камеры также происходит через автомат давления.

Высотно-компенсирующий костюм ВКК-15К в сочетании с кислородной маской КМ-35М и защитным шлемом ЗШ-7 предназначен для обеспечения необходимых жизненных условий и защиты от вредного влияния декомпрессии и разрежения при разгерметизации кабины или при катапультировании на высотах более 11 км, а также для защиты от перегрузок на всех высотах. Костюм ВКК-15К имеет камерное компенсирующее натяжное устройство и встроенную систему вентиляции. В области верхних конечностей компенсирующие устройства отсутствуют.

Для повышения переносимости перегрузок бортовая кислородная аппаратура обеспечивает создание необходимого давления в камерах противоперегрузочного устройства костюма ВКК-15К (ВМСК-4-15) или в камерах противоперегрузочного костюма ППК-3Р-120, а также создание соответствующего избыточного давления в кислородной маске КМ-35М (при $n_y > 4$).

Самолет Су-35С оснащен кислородной системой КС-129, обеспечивающей летчика кислородом при полетах на высоте до 20 000 м с неограниченной подачей кислорода, обеспечиваемой бортовой кислорододобывающей установкой (БКДУ).

Самолет Су-57 оснащен кислородной системой КС-50, которая по сравнению с базовой системой КС-129 имеет меньшую массу и более надежна за счет дублированной системы газоанализа и применения резервного источника кислорода РИК-50. Автомат давления АД-17, входящий в состав КС-50, имеет механизм упреждающего наддува противоперегрузочного костюма, который срабатывает от сигнала бортовой информационно-управляющей системы за секунду до начала перегрузки. Кроме того, на самолете Су-57 при действии перегрузок бортовая ЭВМ включает упреждающее срабатывание защиты не позднее секунды до начала перегрузки и создает избыточное давление в кислородной маске КМ-36М в фазе вдоха. Неограниченная подача кислорода обеспечивается БКДУ.

Повышенные значения продольной и боковой перегрузок могут влиять прежде всего на вестибулярные и соматосенсорные ощущения летчика и его оценку пространственного положения самолета. Продольная перегрузка, вызывая смещение отолитов в переднезаднем направлении, может вызывать иллюзию кабрирования или пикирования. Боковая перегрузка по аналогичному механизму может вызывать иллюзию крена [7]. В выполненных ранее исследованиях установлено, что выраженность иллюзии крена при действии боковой перегрузки различная у людей с преимущественно зрительной или преимущественно вестибулопроприоцептивной модальностью восприятия пространства.

Сравнительный анализ профилей угловых скоростей в обычном режиме и РСМ позволил установить, что средние значения скорости крена в РСМ выше, чем в обычном режиме, на 14 %, рыскания – на 64 %, пикирования – в 2 раза, кабрирования – в 10 раз и более. Скорость крена достигала 171°/с, рыскания – 65°/с, тангажа на кабрирование – 48°/с, на пикирование – 43°/с. Время воздействия угловых скоростей на вестибулярный анализатор летчика в соответствии с полученными профилями

Таблица

Характеристики управляющих воздействий летчика на ручку управления самолетом в сверхманевренном и обычном режиме

Параметр	Сверхманевренный режим		Обычный режим	
	Ср. знач.	Станд. откл.	Ср. знач.	Станд. откл.
Управляющие воздействия летчика на РУС в продольном канале				
Амплитуда, мм	27,6	5,7	12,4	3,5
Частота за 1 мин	20,9	3,3	8,0	3,5
Рабочие движения, %	75,1	5,0	37,9	17,5
Корригирующие движения, %	12,5	4,1	1,1	2,1
Фоновые движения, %	12,4	6,4	60,9	18,5
Управляющие воздействия летчика на РУС в поперечном канале				
Амплитуда, мм	40,1	11,3	17,5	5,8
Частота за 1 мин	20,5	2,7	9,7	4,3
Рабочие движения, %	75,4	4,1	56,0	16,7
Корригирующие движения, %	12,0	3,7	2,3	3,8
Фоновые движения, %	12,6	5,5	41,7	17,4

вращений составило от 5 до 25 с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что летчик в РСМ подвергается воздействию больших, чем в обычном режиме, угловых ускорений, особенно в направлениях рыскания и тангажа, что создает повышенную нагрузку на вестибулярный анализатор. При выполнении маневров наблюдались вращения во всех 3 плоскостях, что обуславливает воздействие прецессионных ускорений (ускорений Кориолиса) на рецепторы полукружных каналов вестибулярного анализатора.

Результаты сравнительного исследования УВЛ на РУС в режиме РСМ и в обычном режиме представлены в таблице.

Результаты анализа УВЛ на РУС свидетельствуют о том, что при переходе из обычного режима полета в РСМ амплитуда движений возрастает в 2,3 раза в продольном и поперечном каналах. Частота движений увеличивается в 2,1 раза в поперечном канале и в 2,6 раза в продольном канале. Соотношение рабочих, корригирующих и фоновых движений в сверхманевренном режиме изменяется с увеличением долей рабочих и корригирующих движений и уменьшением доли фоновых движений.

Выявленные изменения характеристик УВЛ свидетельствуют о существенной перестройке структуры деятельности летчика при переходе из обычного режима в РСМ. С точки зрения моторного компонента деятельности в полете, включающем РСМ, можно выделить стационарные режимы: обычный и сверхманевренный, и переходные режимы: от обычного к сверхманевренному и от сверхманевренного к обычному. Переходные режимы отличаются от стационарных тем, что в это время происходит перестройка моторного стереотипа деятельности.

Результаты исследования УВЛ на органы управления в реальных полетах позволили определить особенности профессиональной деятельности в режиме сверхманевренности:

– повышенный темп деятельности либо резкая смена темпа деятельности на участках выхода на закритические углы атаки;

– повышенные требования к ситуационной осведомленности, распределению внимания, контролю пространственного положения и вертикальной обстановки;

– увеличение амплитуды перемещения органов управления и частоты управляющих воздействий.

Скоротечность этапа выхода на закритический угол атаки требует высокого темпа деятельности летчика: моторного и сенсорного компонентов, непрерывности и полноты ситуационной осведомленности. Обратный переход режима полета в обычный сопровождается выходом на докритические углы атаки и разгоном скорости, что требует от летчика четких, координированных и умелых действий, быстрого переключения внимания.

По результатам анкетирования летного состава на вопрос, какие неблагоприятные состояния могут развиться в полете в РСМ, потерю пространственной ориентировки указали 37 % опрошенных. На большую вероятность потери пространственной ориентировки в РСМ, чем в обычном режиме, указали 58 % опрошенных.

Ответы летчиков на вопрос, как часто и какие вестибулярные иллюзии пространственного положения могут возникать в РСМ, отражены на рисунке.

По мнению большинства опрошенных летчиков, в качестве подготовки к выполнению полетов в РСМ

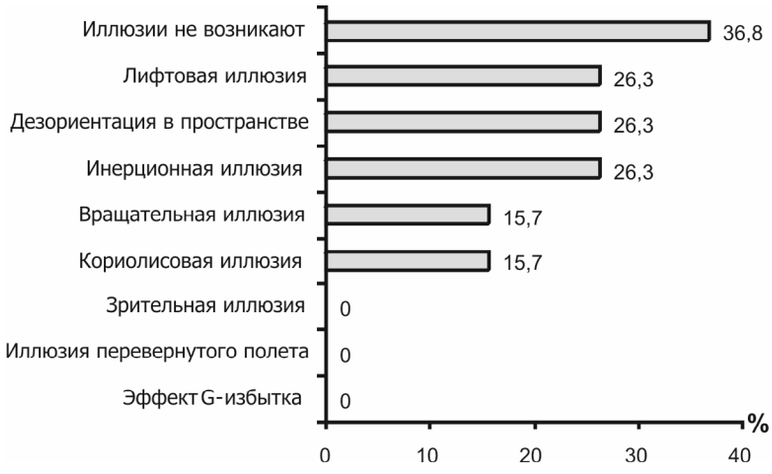


Рисунок. Вестибулярные иллюзии пространственного положения, возникающие в полете у летчика в РСМ

требуется как летное обучение, так и психофизиологическая подготовка. Психофизиологическая подготовка, по мнению летчиков, необходима для формирования летных навыков, развития профессионально важных качеств, тренировки устойчивости организма к факторам полета (знакопеременные ускорения), повышения умственной работоспособности, скорости переработки информации, формирования нового образа полета, в котором учитываются особенности аэродинамики в режиме сваливания и закритических углов атаки. Необходимо также проведение тренировок вестибулярного аппарата и повышение физической работоспособности.

Направления совершенствования индикации в РСМ могут быть связаны с повышением интеллектуальной и информационной поддержки экипажа, для чего необходима разработка систем с элементами искусственного интеллекта. Учитывая, что вектор скорости самолета в РСМ, в отличие от обычного режима полета, может быстро и на значительную величину менять свое направление, перспективным представляется графическое отображение вектора скорости относительно осей самолета на коллиматорном индикаторе или пилотажном кадре многофункционального индикатора. Возможные затруднения зрительного восприятия трехмерного объекта на двумерном индикаторе могут быть устранены путем применения его 3D-визуализации, например, на коллиматорном индикаторе, что потребует оснастить защитный шлем летчика соответствующим светофильтром.

Высокая скорость изменения пространственного положения самолета обусловливает повышенные требования к уровню подготовленности летчика. Следует обратить особое внимание на наличие у летчика динамического пространственного образа полета, сформированного заблаговременно, которому он следует в полете. Поскольку при подобных скоростях вращения возрастает дефицит времени на принятие решений, последовательность перемещения самолета в пространстве должна быть четко сформирована и закреплена на тренировках на этапе наземной подготовки.

В результате обобщения полученных результатов определены факторы сверхманевренности, влияющие на безопасность полетов по психофизиологическим ограничениям:

– изменение характеристик системы управления самолетом в режиме сверхманевренности по сравнению с обычным режимом обусловливает изменение восприятия приборной информации, структуры УВЛ и реакций самолета на них, неоднократную перестройку деятельности в полете;

– высокая скорость изменений положения самолета обусловливает высокий темп деятельности, возможный дефицит времени на принятие решения;

– сохранение устойчивости и управляемости на закритических углах атаки, при этом возможная потеря высоты на выходе из режима сверхманевренности может быть опасным фактором на малой высоте;

– повышенные разнонаправленные знакопеременные ускорения и перегрузки могут вызывать иллюзии пространственного положения, потерю пространственной ориентировки, а также укачивание, головокружение.

В соответствии с полученными результатами можно определить наиболее актуальные методы психофизиологической подготовки летчиков к сверхманевренным полетам. Существующий набор методов подготовки, включающий подъемы в барокамере, тренировочные вращения на центрифуге, вестибулярные тренировки и др., должен быть дополнен тренировками, развивающими пространственные способности летчиков, скорость восприятия и переработки информации, устойчивость пространственной ориентировки и ситуационной осведомленности в условиях действия знакопеременных ускорений и перегрузок.

Возникает необходимость организации и внедрения в практику подготовки летного состава динамических стендов-демонстраторов иллюзий пространственного положения. Демонстрация летному составу зрительных и вестибулярных иллюзий должна проводиться на специальных динамических тренажерах-демонстраторах, которые дополнительными перемещениями формируют у обучаемых ощущение перемещения в состоянии иллюзии. Такие тренажеры «подыгрывают» иллюзии реальным перемещением кабины, чтобы

достичь обучающего эффекта у 100 % летчиков. «Добавочное» перемещение кабины (например, наклон в сторону), моделирующее типичную ошибку восприятия, не отображается на показаниях приборов. В этом заключается особенность тренажеров-демонстраторов иллюзий и их важное отличие от авиационных тренажеров, на которых показания приборов полностью соответствуют алгоритму работы системы подвижности.

Технология виртуальной реальности (ВР) в настоящее время динамически развивается, ее уровень развития на сегодняшний день соответствует уровню традиционных тренажеров. Более сильный эффект присутствия в очках ВР, чем в традиционном тренажере, возникающий за счет усиления визуальной составляющей, позволяет применять вместо полноценной системы подвижности систему подвижности малого хода, которая обеспечивает реалистичное отображение акселерационных эффектов и вибрации. Это реализовано в настоящее время в виде процедурных ВР-тренажеров на системе подвижности для самолетов и вертолетов.

Для подготовки к сверхманевренным полетам ВР может быть применена для тренировок, направленных на поддержание ситуационной осведомленности летчика в быстро меняющихся условиях полета, а также обучения навыкам включения и выключения режима сверхманевренности.

Выводы

1. В сверхманевренном режиме в подобласти форсированных режимов на летчика действуют пилотажные перегрузки n_y, аналогичные по величине обычному режиму. Продольные и боковые перегрузки в РСМ превышают аналогичные показатели в обычном режиме в 1,5–2 раза. Пилотажные перегрузки в РСМ носят кратковременный характер, что снижает риск гемодинамических эффектов (нарушение зрения, потеря сознания). Однако увеличение градиента перегрузок и их частая смена могут приводить к «пуш-пул»-эффекту, а также влиять на пространственную ориентировку летчика.

2. Повышенные значения продольной и боковой перегрузок оказывают влияние на вестибулярные и соматосенсорные ощущения летчика и его оценку пространственного положения самолета. Продольная перегрузка, вызывая смещение отолитов в переднезаднем направлении, может вызывать иллюзию кабрирования или пикирования. Боковая перегрузка по аналогичному механизму может вызывать иллюзию крена.

3. Угловые ускорения в РСМ выше, чем в обычном режиме, в среднем в 2–4 раза. Время воздействия угловых скоростей составляет до 25 с, что может приводить к вращательным иллюзиям крена, кабрирования, пикирования. Наблюдаются перекрестно связанные ускорения, которые могут приводить к укачиванию и дезориентации по типу иллюзии Кориолиса.

4. При переходе из обычного режима полета в сверхманевренный режим расход РУС возрастает в 2,3 раза в продольном и поперечном каналах. Частота УВЛ увеличивается в 2,1–2,6 раза. Соотношение рабочих, корригирующих и фоновых движений в РСМ изменяется с увеличением долей рабочих и корригирующих движений и уменьшением доли фоновых движений.

5. Наиболее эффективными методами психофизиологической подготовки летчиков к сверхманевренным полетам являются тренировки на динамических стендах, а также стендах на основе ВР, развивающих пространственные способности летчиков, скорость восприятия и переработки информации, устойчивость пространственной ориентировки и ситуационной осведомленности в условиях действия знакопеременных ускорений и перегрузок.

6. Совершенствование индикации в режиме сверхманевренности может быть связано с повышением информационной поддержки экипажа, разработками в области искусственного интеллекта. Перспективным представляется графическое отображение вектора скорости относительно осей самолета на коллиматорном индикаторе или пилотажном кадре многофункционального индикатора.

Список литературы

1. *Балык О.А.* Методология испытаний самолета на режимах сверхманевренности // Авиапанорама. 2016. Т. 6. № 120. С. 34–41.

Balyk O.A. Aircraft test methodology for supermaneuverability modes // Aviapanorama. 2016. V. 6. № 120. P. 34–41.

2. *Айвазян С.А., Пономаренко В.А.* Смысл авиации пятого поколения. М., 2016.

Ayvazyan S.A., Ponomarenko V.A. The meaning of aviation of fifth generation. Moscow, 2016.

3. Психофизиологическая подготовка летного состава / В.А. Бодров, В.А. Пономаренко, ред. М.; Л., 1989.

Psychophysiological training of flight personnel / V.A. Bodrov, V.A. Ponomarenko, eds. Moscow; Leningrad, 1989.

4. *Lyons T.J.* Human consequences of agile aircraft: RTO Technical Report 15. RTO-TR-015 AC/323(HFM-015) TP/15. Paris, France 2001.

5. *Кузьмин А.С., Кукушкин Ю.А.* Методы автоматического анализа управляющих воздействий летчика в задачах оценки его тренированности // Вопросы кибернетики. Имитационное моделирование деятельности оператора в авиации и космонавтике / Б.Ф. Ломов, В.А. Пономаренко, В.М. Васильц, ред. М., 1990. С. 126–135.

Kuz'min A.S., Kukushkin Yu.A. Methods for automatic analysis of pilot control actions in order to assess his training // Cybernetics. Simulation of the operator's activities in aviation and astronautics / B.F. Lomov, V.A. Ponomarenko, V.M. Vasilets, ed. Moscow, 1990. P. 126–135.

6. *Banks R., et al.* The effects of varying time exposure to -Gz on subsequent decreased +Gz physiological tolerance (push-pull effect) // Aviat. Space Environ. Med. 1995. V. 66. P. 723–727.

7. *Бухтияров И.В., Воробьев О.А., Хоменко М.Н.* Исследование ориентировки человека относительно вертикали при воздействии боковых и сочетанных продольно-боковых перегрузок // Авиакосм. и экол. мед. 1996. Т. 30. № 1. С. 16–21.

Bukhtiyarov I.V., Vorobiev O.A., Khomenko M.N. Investigation of a human orientation relative to the vertical when exposed to lateral and combined longitudinal-lateral overloads // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1996. V. 30. № 1. P. 16–21.

Поступила 25.02.2022

PSYCHOPHYSIOLOGICAL ASPECTS OF EXECUTING SUPERMANEUVER FLIGHTS

Zatsepilin A.V., Khomenko A.V., Filatov V.N., Chistov S.D., Simukhin V.V., Kisliakov Yu.Yu.

Central Research Institute of the Air Force of Ministry of Defense of Russian Federation

Acceleration and g-load values were calculated based on the objective control data records of supermaneuver flights. Pilots filled out. The authors propose methods of psychophysiological training substantiated by the results of analysis of pilots' entries in a questionnaire addressing some psychophysiological aspects of flying supermaneuver aircrafts.

Key words: super-maneuverability, g-load, acceleration, spatial awareness, indication, psychophysiological training.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 39–45.

УДК 159.98

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ОТБОРА ВОЕННЫХ ЛЕТЧИКОВ-ИСПЫТАТЕЛЕЙ

Писаренко Ю.Э., Чулаевский А.О., Рыбникова М.Н.

Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва

E-mail: chulaevskij70@mail.ru

Представлен анализ состояния вопроса профессионального психологического отбора (ППО) кандидатов в летчики-испытатели в России и за рубежом, обоснован подбор психодиагностических методов в целях ППО кандидатов в летчики-испытатели, которые включены в проект «Руководство по профессиональному психологическому отбору кандидатов в Центр подготовки летчиков (штурманов)-испытателей».

Для успешной деятельности летчиков-испытателей требуется высокий уровень развития ряда психических качеств. Для их оценки был подобран комплекс психодиагностических методов, разработаны рациональные методические приемы изучения и оценки профессионально-важных качеств (ПВК), позволяющие достаточно точно прогнозировать пригодность к обучению профессии военного летчика-испытателя.

Разработка и внедрение в практику системы ППО летчиков-испытателей позволит снизить аварийность, повысить эффективность и безопасность полетов.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, летчики-испытатели, особенности профессиональной деятельности испытателей, профессионально важные качества, прогноз пригодности к обучению профессии.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 46–53.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-46-53

Профессия военного летчика-испытателя, работающего на передовом рубеже научно-технического прогресса, чья деятельность неимоверно сложна и сопровождается исключительными психологическими нагрузками, имеет выраженную специфику, резко отличающую ее от всех остальных профессий.

Создание новых летательных аппаратов – это результат напряженного труда сотен людей. В каждой детали самолета – тысячи расчетов, десятки вариантов, лабораторные и стендовые испытания. Но итогом всей сложной и кропотливой работы являются летные испытания, и только один человек – летчик-испытатель дает в реальных полетах целостную картину качествам самолета и его оборудованию.

Как известно, профессиональный психологический отбор – это система мероприятий, направленных на выявление лиц, в наибольшей мере соответствующих по своим психологическим свойствам, возможностям и способностям конкретной специальности [1].

Проблема психологического отбора летного состава возникла почти одновременно с появлением авиации.

Система профессионального психологического отбора в Военно-воздушные силы в нашей стране была разработана в 60-х гг. XX в. и введена в действие директивой Главнокомандующего ВВС № 1488 от 20 мая 1964 г.

Значительный вклад в разработку системы ППО летчиков внесли такие известные ученые, как К.К. Платонов, Б.Л. Покровский, В.Л. Марищук, В.А. Бодров, В.М. Звоников, Д.И. Шпаченко, И.В. Агапов, А.А. Ворона и др.

Закономерно, что чем сложнее профессия, тем выше необходимость выбора для ее освоения наиболее одаренных, способных лиц, обладающих определенными психологическими качествами. В сложности и уникальности профессии летчика-испытателя сомневаться не приходится, ведь испытатель – это специалист, самостоятельно решающий судьбу летательного аппарата. В его профессиональном уровне, образе мыслей и чувств, в его совести заложены успехи или промахи, причем весомые: экономические, технические и даже социальные [2].

Высокая значимость деятельности летчиков-испытателей обязывает неуклонно совершенствовать систему их отбора и подготовки, включая и вопросы психологического изучения.

Совершенствование испытательных полетов можно разделить на 3 периода: ранний период, когда каждый авиатор, а часто и сам конструктор самолета был летчиком-испытателем; переходный

период, когда летчики-испытатели и исследователи, участвующие в испытаниях, начали создавать методику летных испытаний и установили ряд нормативов для характеристик самолетов; и, наконец, нынешний период, когда характер испытаний и нормативы четко определены и испытания ведутся летчиком по определенному плану.

Если в процессе двух первых периодов испытателей выдвигала сама жизнь, то в последующем, с ускорением научно-технического прогресса и развитием авиации, расширением круга задач, решаемых ею, возникла потребность в специальной подготовке летчиков-испытателей и отборе кандидатов для такой подготовки.

В настоящее время как у нас в стране, так и в некоторых других странах существуют специальные школы (центры) по подготовке летчиков-испытателей. По данным печати, за рубежом имеются следующие учебные заведения по подготовке военных летчиков-испытателей: одна во Франции, две школы в США – на авиабазе Эдвардс для летчиков ВВС и в Патуксен-Ривер, штат Мэриленд, для летчиков авиации ВМС, школа летчиков-испытателей в Англии и школа летчиков-испытателей в Японии.

В России действуют два центра подготовки летчиков-испытателей – школа летчиков-испытателей по подготовке кадров для гражданской авиации – ШЛИ им. А. В. Федотова, созданная в 1947 г. на базе Летно-исследовательского института, и Центр подготовки летного состава – испытателей ВВС при Государственном ордена Ленина Краснознаменном летно-испытательном центре им. В.П. Чкалова (ГЛИЦ), существующем с 1920 г.

Обучение в ГЛИЦ двухгодичное. Сначала в течение учебного года слушатели получают весь объем знаний по всем методикам летных испытаний. После теоретических экзаменов обучаемые проходят летную практику, которую проводят инструкторы – летчики-испытатели по ведущим направлениям. В ходе контрольных и тренировочных полетов обучаемые осваивают в воздухе те элементы, которые в дальнейшем пригодятся им при испытании авиационной техники.

Поступающие в школу летчиков-испытателей кандидаты имеют высокий профессиональный уровень. Они прошли первичный психологический отбор еще при поступлении в летное училище. Весь период их жизни, по существу, являлся не чем иным, как естественным пролонгированным отбором, и тот факт, что кандидаты его успешно преодолели, а также желание и активное стремление стать летчиком-испытателем уже свидетельствуют об определенной профессиональной пригодности к испытательской деятельности.

Профессиональный психологический отбор в Центр подготовки летчиков-испытателей (ЦПЛИ) был впервые введен в 1984 г. Система отбора была разработана специалистами Института авиационной и космической медицины [3]. Разработанная система профессионального психологического отбора позволяла с достаточной вероятностью оценивать необходимые для успешной испытательской деятельности профессионально важные психологические и характерологические качества.

Однако жизнь не стоит на месте. За прошедшие десятилетия далеко вперед шагнула и сложность авиационной техники, и методика подготовки летного состава, и научные разработки в области психологического отбора. Ниже представлено состояние вопроса и его актуальность.

Современное состояние вопроса

Основными факторами, требующими учета в системе профессионального психологического отбора (ППО) летчиков-испытателей, являются:

– разнообразие и новизна испытываемой техники;

– наличие большого опыта, качеств первоклассного летчика, способность к исследовательской работе;

– изменение маневренности, увеличение функциональных возможностей авиационной техники;

– рост длительности пилотажных перегрузок, повышение требований к выносливости организма;

– рост автоматизации управления;

– «отчуждение» летчика от процесса управления к ослаблению у летчика «чувства самолета»;

– появление новых средств ведения и обеспечения боевых действий: систем разведки, связи и управления оружием, радионавигации, средств радиоэлектронной борьбы, дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) и т.п.;

– возрастание психофизиологических нагрузок, требований к концентрации и переключению внимания;

– постоянный рост стоимости испытываемой техники, минимизация сроков испытаний;

– возрастание социальной ответственности за выполнение полетного задания.

Проблема:

– несоответствие существующей системы ППО летчиков-испытателей современному уровню развития психологии, авиационной техники, средств и способов ведения боевых действий.

Так, разнообразие и новизна испытываемой техники требуют от летчика-испытателя наличия большого опыта, качеств первоклассного летчика, способностей к исследовательской работе.

Постоянное возрастание скоростей, маневренности, диапазона высот полета, всепогодность полетов ведут к постоянному росту пилотажных перегрузок, повышению требований к выносливости организма.

Количественный и качественный рост бортовых и наземных систем автоматизации управления ведет к «отчуждению» летчика от процесса управления, к ослаблению у летчика «чувства самолета» и необходимости наличия у летчика специфических профессионально важных качеств (ПВК).

Появление новых средств ведения и обеспечения боевых действий, таких, как системы разведки, связи и управления оружием, радионавигации, средств радиоэлектронной борьбы, ДПЛА и т.п., ведет к возрастанию психофизиологических нагрузок, требований к концентрации и переключению внимания.

Постоянный рост стоимости испытываемой техники, жесткие требования по минимизации сроков испытаний вызывают необходимость высочайшей социальной ответственности за выполнение полетного задания.

Учет этих факторов требует корректировки приоритетов ПВК, подбора адекватных психодиагностических и психопрогностических методов оценки уровня ПВК, выбора соответствующих показателей и критериев принятия решения о профессиональной пригодности кандидата к работе летчиком-испытателем.

С этой целью была разработана современная система профессионального психологического отбора летчиков-испытателей ВВС.

Решение этой проблемы предполагает прохождение нескольких этапов.

Первый этап заключается в изучении профессиональной деятельности летчиков-испытателей, выявлении ее отличий от деятельности летчиков строевых частей и описании перечня особенностей деятельности летчиков-испытателей.

Второй этап предполагает разработку профессиограммы и психограммы летчиков-испытателей. Под профессиограммой понимается система признаков, описывающих профессию, включающая в себя перечень норм и требований, предъявляемых этой профессией к летчику-испытателю.

Психограмма – это составная важнейшая часть профессиограммы. Она представляет собой основные, наиболее важные требования, предъявляемые профессией к психологическим качествам летчиков-испытателей [4].

Главными источниками информации для составления психограммы являются:

– письменные документы по специальности: положения, описания, инструкции, хронометражные таблицы и др.;

– личные наблюдения, письменные и устные опросы летчиков-испытателей, анкеты;

– данные специально проведенных пилотажных и эргономических исследований.

Следующим, третьим этапом на пути создания системы ППО является анализ профессиограммы и выделение ПВК летчиков-испытателей.

На четвертом этапе проводится анализ существующих методов оценки уровня ПВК (тестов, методик, аппаратуры, АСПО и т.д.) и подбор адекватных методов оценки уровня ПВК летчиков-испытателей, обладающих свойствами психодиагностичности и психопрогностичности.

Пятый этап – создание единого комплекса методов оценки ПВК (структурированной системы, подразумевающей ранжирование методик, выбор показателей для бланковых и компьютерных методик, для комплексной оценки ППО).

Далее следует определение критериев принятия решения о профессиональной пригодности кандидата к работе летчиком-испытателем. И наконец, заключительным этапом является создание руководящего документа по ППО летчиков-испытателей.

Вся эта работа была проведена за 2 года в НИИЦ (АКМ и ВЭ), в рамках НИР «Испытатель» [5].

Результаты и обсуждение

В соответствии с изложенным планом коллективом авторов было проведено изучение профессиональной деятельности летчиков-испытателей для выявления ее отличий от деятельности летчиков строевых частей (табл. 1).

Результаты анкетирования, изучение литературы, наблюдение за профессиональной деятельностью и беседы с летчиками-испытателями позволили выделить специфические особенности их работы.

Первой и основной особенностью является выполнение полетных заданий, носящих исследовательский характер и отличающихся своей направленностью, сложностью и содержанием от работы летчиков строевых частей. К этому относятся:

– выполнение полетов на различных типах самолетов, работа с разнообразным оборудованием;

– высокая вероятность возникновения отказов и непредвиденных ситуаций в полете;

– необходимость ведения постоянного наблюдения за испытываемым объектом или системой при одновременном осуществлении процесса пилотирования;

– выполнение пилотирования на критических режимах, проверка поведения самолета и его систем при отказах;

– регистрация и анализ получаемых в полете экспериментальных данных;

– проведение инженерно-психологической оценки компоновки кабины и работы с оборудованием и приборами.

Второй особенностью деятельности летчика-испытателя является обязательное планирование и инженерный анализ выполняемых испытательных полетов.

Третьей особенностью является высокая социальная значимость, ответственность

Таблица 1

Основные отличия деятельности летчиков-испытателей от летчиков строевых частей

Летчики строевых частей	Летчики-испытатели
Предназначение	
Летная деятельность пилота строевой части – выполнение боевых задач по предназначению вида авиации и типа самолета	Работа летчика-испытателя заключается в установлении возможностей авиационной техники и ее доработки для эксплуатации летчиками строевых частей по предназначению
Характер летной работы	
Летная работа проводится согласно плану курса боевой подготовки (КБП) в строгом соответствии с руководством по летной эксплуатации (РЛЭ). Она отличается относительным однообразием при длительном прохождении службы в одной и той же воинской части и, как правило, на одном типе самолета	Работа характеризуется разнообразием полетных заданий, выполняемых на различных типах ЛА. Полетные задания часто отличаются особой сложностью, связанной с новизной техники, ее отказами, отсутствием летной практики на различных режимах эксплуатации ЛА и т.п.
Цель полетов	
Полеты выполняются с целью формирования навыков техники пилотирования в рамках КБП, навыков применения вооружения, отработки группового взаимодействия между экипажами при ведении воздушного боя (или бомбометании). При этом в целях безопасности не допускается отклонение режимов полета от установленных	Полеты выполняются для поиска грани возможности эксплуатации самолета, проверки инженерных расчетов в полете. Летательный аппарат целенаправленно вводится в критические режимы полета, чтобы отыскивать оптимальные способы выведения его из таких режимов. Безопасность выполнения испытательных полетов очень условна
Анализ полетов	
Анализ выполнения полетных заданий проводится с целью оценки качества подготовленности к выполнению боевых действий, выявления ошибок членов экипажей и нарушений эксплуатации ЛА, влияющих на эффективность и безопасность	Осуществляется анализ «поведения» ЛА на различных режимах полета, работа авиационного оборудования, эргономические проблемы, усложняющие деятельность летчика. Необходимо по первым признакам критической ситуации ее распознать и предпринять эффективные действия только на основе своего опыта и мастерства Летчик должен до выяснения точных причин целенаправленно провоцировать развитие таких ситуаций и находить пути ее решения в условиях крайней скоротечности протекания. Необходимо чувствовать поведение ЛА и прогнозировать развитие полетной ситуации Умение грамотно анализировать каждый полет, формулировать соответствующие письменные отчеты, четко описывать свои ощущения, замечания, предположения и т.п., при этом отстаивая свое мнение, даже если оно не совпадает с мнением начальства

летно-испытательской деятельности. Конструкторы, ученые, инженеры – все, кто причастен к созданию авиационной техники, – очень часто объективную информацию могут получать только из одного источника – от летчика-испытателя. Поэтому такие качества, как честность, объективность оценки, умение доказать и отстоять свою точку зрения, высокий профессионализм, являются неотъемлемыми чертами личности испытателя.

Проведенный выше анализ специфических особенностей деятельности испытателя позволяет конкретизировать основные качества, необходимые будущему летчику-испытателю. Анализ выявленных отличий позволил на следующем этапе создания системы ППО выделить ПВК летчиков-испытателей, представленных в виде блоков в табл. 2.

Общепринято, что предметом ППО является содержание первых 3 блоков структуры.

Анализ выявленных ранее особенностей профессиональной деятельности летчиков-испытателей и содержания структуры ПВК позволил выделить для летчиков-испытателей такие ПВК, которые требуют особого учета в создаваемой системе ППО (табл. 3).

Для выделенных ПВК осуществлен подбор адекватных методов оценки их уровня (табл. 4).

Особое место среди этих методик занимает комплексная методика исследования особенностей мышления (МИОМ), позволяющая учесть возросшую значимость интеллекта в летно-испытательской деятельности. Также в батарею тестов были включены два комплексных личностных опросника («Адаптивность» и 16-ФЛО) с целью более полного учета индивидуально-характерологических свойств личности кандидатов.

Выбор данных методик обусловлен следующими обстоятельствами:

1) показатели этих методик позволяют изучать уровень наиболее важных для летно-испытательской деятельности интеллектуальных, личностных и психофизиологических качеств;

Таблица 2

ПВК летного состава Воздушно-космических сил России

ПВК	Психологическое содержание ПВК
1. Личностные (характеризуют профессиональную направленность, нравственность, морально-боевые качества, характер и др. черты личности, составляющие основу профессиональной пригодности)	– долговременная мотивация на профессию; – волевые качества: целеустремленность, настойчивость, сильная воля, способность к обоснованному риску, решительность, смелость; – нравственные качества: чувство долга, честность, порядочность, товарищество; – способность к правильной самооценке; – способность к психической адаптации в различных условиях; – устойчивость личности к неблагоприятным воздействиям; – социальные качества: склонность к лидерству, коммуникабельность, – нравственные ценностные ориентации, стремление к профессиональному совершенству
2. Интеллектуальные (характеризуют способность к переработке, усвоению информации и принятию решений, требующие от оператора высокого уровня развития познавательных психических процессов)	– развитость ощущений и восприятий (летное чувство); – яркость, четкость и контролируемость пространственных представлений; – продуктивность и помехоустойчивость мышления; – быстрота, точность и прочность памяти; – большой объем, быстрое переключение и устойчивость внимания; – способность к ориентировке в сложном пространственном окружении и непредвиденных ситуациях; – способность к действиям в условиях дефицита времени и навязанного темпа работы; – развитость эвристического, системного и образного типов мышления
3. Психофизиологические (характеризуют умение управлять своим функциональным состоянием, определяются физиологическими свойствами и резервными возможностями организма)	– нервно-эмоциональная устойчивость; – устойчивость к летному утомлению; – устойчивость к монотонии и работе в вынужденном темпе
4. Физиологические	– вестибулярная устойчивость; – координированность; – устойчивость к длительным перегрузкам и к другим специфическим факторам полета
5. Физические	– общее физическое развитие: сила, быстрота, выносливость; – антропометрические качества

2) многолетний опыт применения большинства из них в практике ВВС свидетельствует о их высокой диагностической и прогностической валидности, что подтверждается данными предыдущих исследований: показатели всех этих методик превышают статистически достоверный порог уровня корреляционной связи;

3) использование данных методик не требует специальной длительной подготовки и выработки навыка, большинство из них компактны и не занимают много времени.

В результате было принято во внимание, что использование этих методик обеспечивает преемственность психодиагностики на различных этапах профессиональной подготовки летчика (ВВАУЛ – центры переучивания – авиационные части – ЦПЛИ).

Одним из наиболее ответственных этапов разработки системы ППО является определение критериев принятия решения о профессиональной пригодности кандидата к работе летчиком-испытателем. На этом этапе осуществляется:

– разработка нормативно-оценочных шкал методик;

– корректировка результатов обследования кандидатов по психодиагностическим методикам с учетом наблюдения, собеседования и анкетирования;

– ранжирование кандидатов по комплексным итоговым оценкам.

Проведенные исследования показали, что при разработке нормативно-оценочных шкал методик для летчиков-испытателей следует ориентироваться на более высокие показатели уровней развития их ПВК, чем у обычного летного состава. Это видно из данных, представленных в таблице 5.

Результаты обследования свидетельствуют о более высоком уровне развития у

Таблица 3

ПВК летчиков-испытателей, требующие особого учета в системе ППО

ПВК	Психологическое содержание ПВК
2. Интеллектуальные	– развитость эвристического, системного и образного типов мышления; – способность к творчеству, исследовательской работе, нахождению нестандартных решений; – большой объем, быстрое переключение и устойчивость внимания; – быстрота, точность и прочность памяти; – словесно-логические способности (способность работать с документацией, формулировать и излагать свою точку зрения)
3. Психофизиологические	– нервно-эмоциональная устойчивость; – устойчивость к летному утомлению; – выраженная устойчивость к работе в условиях монотонии и вынужденном темпе

Таблица 4

Психодиагностические методики для выявления ПВК летчиков-испытателей

Наименование методики	Содержание, позволяющее оценивать
МИОМ	Оценка структуры интеллекта, особенности мышления
«Часы»	Оперирование пространственными представлениями
«Шкалы»	Оперативная память
V-тест	Визуализация образов
ЧКТ	Объем, распределение, переключение внимания
Деление отрезка пополам	Определение способности к восприятию пространственных объектов (глазомера)
16-ФЛО	Основные личностные и характерологические свойства
МЛО «Адаптивность»	Психофизиологические и социально-психологические характеристики личности

Таблица 5

Сравнение уровней развития некоторых познавательных психических процессов у летчиков-испытателей и летчиков строевых частей

Обследуемый контингент	Результаты обследования (X/m)		
	Оперативная память («Шкалы»)	Оперирование пространственными представлениями («Часы»)	Внимание («Отыскивание чисел с переключением»)
Летчики строевых частей	5,7 / 0,3*	24,6 / 0,5*	214,7 / 6,2**
Летчики-испытатели	6,9 / 0,5*	27,3 / 1,6*	187,8 / 6,6**

Примечание. * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$ (t-критерий Стьюдента).

летчиков-испытателей интеллектуальных ПВК. Как следует из таблицы, статистически достоверный уровень различий обнаруживается, например, по качествам внимания («Отыскивание чисел с переключением»), оперативной памяти («Шкалы») и особенностям восприятия пространственных отношений («Часы»).

На основании проведенных психологических обследований кандидатов в ЦПЛИ были разработаны нормативно-оценочные шкалы отобранных психодиагностических методик. Результаты каждой методики подразделяются на 4 уровня: низкий, средний, выраженный и высокий. Показатели по всем методикам, выраженные в одних и тех же единицах, позволяют

сравнивать индивидуальные результаты по всем свойствам, оценивать достигнутый уровень и устанавливать относительное положение индивида в группе.

Данные, полученные в процессе психологического обследования кандидатов при поступлении в ЦПЛИ, корректируют с учетом результатов наблюдения, собеседования и анкетирования, которые позволяют составить впечатление и сделать выводы о таких индивидуально-психологических особенностях кандидата, как направленность на летную службу, психическая устойчивость, эмоционально-волевая стабильность, социальная нормативность, склонность к лидерству и др.

В результате работы по созданию системы ППО летчиков-испытателей было подготовлено «Руководство по профессиональному психологическому отбору кандидатов в Центр подготовки летчиков-испытателей» [5].

Структура «Руководства по профессиональному психологическому отбору кандидатов в ЦПЛИ» содержит как теоретические обоснования, так и практическое описание используемых психологических методик, процедуры составления заключений и нормативы оценок.

В преамбуле «Руководства» излагаются общие положения, включающие определение психологического отбора, его содержание и методику составления заключений. Кроме того, очерчен круг должностных лиц, отвечающих за проведение ППО, анализ результатов, общее методическое руководство.

Далее следует изложение основных психологических требований к кандидатам, а также раздел «Организация психологического отбора».

Описание методик изучения индивидуально-психологических характеристик личности кандидатов разбито на подразделы, поскольку каждая группа методов обладает своей спецификой, отличается как организационными особенностями, так и долей вклада в итоговую оценку обследования.

В первый подраздел включены методы социально-психологического изучения личности кандидатов: анализ материалов личного дела, анкеты кандидата, наблюдение и индивидуальное собеседование.

Во втором подразделе описываются психодиагностические методы обследования кандидатов: интеллектуальные и личностные.

Наиболее важным разделом «Руководства» является раздел составления заключений. В нем четко и подробно описана процедура выведения итоговой оценки психологического обследования, представлены нормативные шкалы каждой методики.

В приложении приведены образцы методик, основных документов и заключений психологического отбора, таких, как протокол психологического обследования, анкета, результаты наблюдения и протокол беседы с кандидатом.

Экспериментальное психологическое обследование кандидатов, поступающих в ЦПЛИ, подтвердило правомерность и целесообразность применения отобранных психодиагностических методик.

Сопоставление результатов психологического обследования с внешними критериями летчиков-испытателей (оценками их экзаменов при выпуске из ЦПЛИ) показало высокий уровень прогностической валидности. Так, ранговая корреляция интегрального показателя интеллектуальных ПВК с внешним критерием r = 0,45, а интегрального показателя характерологических (личностных) качеств r = 0,66.

Таким образом, разработка и внедрение в практику системы ППО летчиков-испытателей, основанной на новейших научно-практических достижениях в области прогнозирования профессиональной пригодности, служат цели повышения эффективности их деятельности, улучшения безопасности полетов, экономии средств, снижению аварийности.

Выводы

1. Разработка любой системы ППО лиц операторского профиля, в том числе военных летчиков-испытателей, требует учета новейших теоретических научных достижений в области прогнозирования профессиональной пригодности.

2. Специфическими особенностями деятельности военных летчиков-испытателей, в отличие от летчиков строевых частей, являются: исследовательский характер полетов; выполнение пилотирования на критических режимах; анализ получаемых в полете экспериментальных данных; планирование и инженерный подход к выполняемым испытательным полетам, а также высокая социальная значимость и личная ответственность летчика-испытателя.

3. Основными ПВК военных летчиков-испытателей, которые необходимо учитывать при разработке системы ППО этих специалистов, являются: высокая профессиональная мотивация; чувство долга; способность отстаивать свою точку зрения; склонность к творчеству, к исследовательской работе; развитость мышления, свойств внимания и памяти; способность четко формулировать и излагать свои мысли; нервно-эмоциональная устойчивость, и ряд других.

4. Психодиагностическими методиками, адекватно оценивающими выявленные ПВК военных летчиков-испытателей, являются: Методика исследования особенностей мышления (МИОМ), «Часы», «Шкалы», V-тест, отыскивание чисел с переключением (Черно-красная таблица – ЧКТ), шестнадцатифакторный личностный опросник (16-ФЛО), МЛО «Адаптивность».

5. В процессе исследования было определено, что уровень развития интеллектуальных ПВК у военных летчиков-испытателей выше, чем у летчиков строевых частей.

6. Внедрение в практику разработанной системы ППО военных летчиков-испытателей даст не только высокий экономический эффект в виде экономии средств на обучение будущих специалистов, но и будет способствовать повышению безопасности полетов, снижению аварийности и сохранению боевого потенциала Военно-воздушных сил за счет улучшения качества выпускников ЦПЛИ.

Список литературы

1. Государственный военный стандарт Российской Федерации. ГОСТ РВ 0029–01.001-2008 «Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Профессиональный психологический отбор человека-оператора. Медико-психологические требования к человеку-оператору».

State Military Standard of the Russian Federation. GOST RV 0029–01.001-2008 «System of standards of ergonomic requirements and ergonomic support. Professional psychological selection of a human operator. Medical-psychological requirements to a human operator»

2. *Пономаренко В.А.* Формирование личности летчика-испытателя // Человек в измерениях XX века. Международная общественная академия проблем человека в авиации и космосе. М., 2006. Т. 6. С. 197–218.

Ponomarenko V.A. The formation of the personality of a test pilot // Human measuring the XX century. International public academy for human problems in aviation and space. Moscow, 2006. V. 6. P. 197–218.

3. *Шпаченко Д.И., Звоников В.М.* Методические указания по профессионально-психологическому отбору слушателей Центра подготовки летного состава – испытателей. М., 1984.

Shpachenko D.I., Zvonikov V.M. Methodological guidelines for the professional psychological selection of students of the Test Pilot Training Centre. Moscow, 1984.

4. *Романова Е.С., Суворова Г.А.* Психологические основы профессиографии. М., 1990.

Romanova E.S., Suvorova G.A. Psychological foundations of professography. Moscow, 1990.

5. Разработка и обоснование системы профессионального психологического отбора кандидатов в Центр подготовки летчиков-испытателей // Отчет о НИР, шифр «Испытатель». М., 2016.

Development and justification of the system of professional psychological selection of the candidate in the Test Pilot Training Centre // Report on scientific research work under the code «Test Pilot». Moscow, 2016.

6. *Писаренко Ю.Э., Чулаевский А.О., Покровский Б.Л. и др.* Руководство по профессиональному психологическому отбору кандидатов в Центр подготовки летчиков-испытателей (проект). М., 2016.

Pisarenko Yu.E., Chulaevsky A.O., Pokrovsky B.L. et al. Guidelines for professional psychological screening of candidates for Test Pilot Training Centre (Draft). Moscow, 2016.

Поступила 25.02.2022

UP-T0-DATE APPROACH TO IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF PROFESSIONAL PSYCHOLOGICAL SELECTION OF MILITARY TEST-PILOTS

Pisarenko Yu.E., Chulaevsky A.O., Rybnikova M.N.

Research and Test Center (Aerospace Medicine and Military Ergonomics) of the Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

The authors review the Russian and foreign concepts of psychophysiological selection (PPS) for test-pilots and ground the psychodiagnostic examination methods for applicants for test-pilots. The methods enable to reasonably well assess applicant's aptitude and by this means to reduce the risk of flights accidents.

Key words: professional psychological selection, test-pilots test-pilot profession specifics, must-have qualities, aptitude assessment.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 1. P. 46–53.

УДК 613.693:616.8-085.851

ЭМОЦИОНАЛЬНО-СТРЕССОВАЯ МЕДИКО-ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ С ГИПЕРВЕНТИЛЯЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ: ОЦЕНКА КЛИНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ И ПОКАЗАНИЙ К ПРОВЕДЕНИЮ У ЛЕТНОГО СОСТАВА И КОМБАТАНТОВ

Иванов И.В.[1, 2], Миланин А.А.[3], Желтый О.П.[4], Стась Ю.В.[3]

[1]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
[2]Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург
[3]Государственное бюджетное учреждение города Москвы «Научно-практический реабилитационный центр»
[4]12-й Консультативно-диагностический центр Министерства обороны Российской Федерации, Москва

E-mail: ivanov-iv@yandex.ru

Проанализированы результаты применения эмоционально-стрессовой медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой в процессе комплексного лечения 517 пациентов, из них 211 – лица летного состава и 306 – ветераны боевых действий, мужчины в возрасте на период обследования 22–52 года. Оценена частота психотерапевтических эффектов и индивидуальных клинических реакций при проведении методики.

Разработаны показания и противопоказания к ее проведению для лиц летного состава, проходящих медико-психологическую реабилитацию в санаториях, госпиталях и специализированных реабилитационных центрах. Рекомендовано при применении методики у летного состава проявлять осторожность: при ее проведении у отдельных лиц возможны проявления повышенной судорожной активности головного мозга и эффекты личностной дезориентации. Клинический подход к определению показаний и противопоказаний для применения психокоррекции в сочетании с гипервентиляционной нагрузкой позволяет избежать возможных осложнений и сделать минимальным риск их появления для пациентов с посттравматическими стрессовыми расстройствами.

Ключевые слова: посттравматическое стрессовое расстройство, медико-психологическая коррекция, гипервентиляционная нагрузка, показания и противопоказания, эффективность психотерапии, клинические реакции на психотерапию, военные летчики, ветераны войн.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 54–63.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-54-63

Проблемы реабилитации комбатантов (участников локальных конфликтов и региональных войн) остаются важными проблемами современного общества и приобретают все большую актуальность.

Как показали результаты специальных исследований [1–7] психические расстройства выявляются более чем у 60 % участников военных событий, среди которых большая часть относится к посттравматическим стрессовым расстройствам. Данные нарушения развиваются у 50–80 % людей, перенесших тяжелый стресс в условиях мирной обстановки [8]. Этому способствуют массовые сцены убийства, войн, природных и техногенных катастроф. Также причиной может послужить потеря близких людей, террористические акты, сексуальное насилие, болезни, травмы, операции, похищение людей и др. Выраженность клинической симптоматики находится в прямой зависимости от интенсивности стресса. В связи с этим психокоррекционные методы лечения занимают важное место при медицинской реабилитации комбатантов [9, 10].

Психотерапия, как известно, играет важную роль в лечении подобных расстройств, составляя альтернативу медикаментозному лечению психотропными препаратами. Опыт лечения психических нарушений лекарственными средствами показывает, что нередко при этом проявляются их побочные эффекты в виде нарушений психомоторики и снижения работоспособности. Кроме того, часть ветеранов категорически отказываются от приема медикаментов, несмотря на значительную выраженность симптомов психического расстройства. В этих условиях отдельные психокоррекционные методы приобретают особую ценность.

Спектр психокоррекционных мероприятий с 1990-х гг. пополнился методом трансперсональной или холотропной терапии [11–13]. Однако для его применения у лиц летного состава до настоящего времени недостаточно данных для анализа реакций на проведение, оценки показаний и противопоказаний к применению, что определяет актуальность исследования.

Цель исследования: установить показания к использованию метода эмоционально-стрессовой

медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой на основе оценки клинических реакций и эффективности применения этого метода у летного состава и комбатантов.

Методика

Было обследовано 517 пациентов, из них 211 – лица летного состава и 306 – комбатанты (участники локальных военных конфликтов и региональных войн), мужчин в возрасте на период обследования 22–52 года. Летный состав проходил обследование и лечение в период стационарной врачебно-летной экспертизы. Комбатанты обследовались на базе Центра реабилитации ветеранов «Русь» после возвращения их из районов боевых действий в период от 2 до 11 лет. Комплексное лечение включало хвойно-жемчужные ванны, механомассаж (массажная кушетка «Ормед») или массаж воротниковой зоны, сеансы иглорефлексотерапии болевых зон, занятия лечебной физкультурой, оздоровительное плавание в бассейне, методы психологической коррекции.

При выборе эффективных психотерапевтических приемов исходили из практики применения традиционных психотерапевтических методов – сеансов релаксации и аутогенной тренировки, а также гипноза, при применении которых у данного контингента не удавалось достичь нормализации психоэмоционального состояния, поэтому была предложена методика холотропной терапии [11]. Все пациенты проходили общеклиническое и клинико-психологическое обследование. В табл. 1 представлены нозологические диагнозы лиц, для лечения которых применялась методика холотропной терапии. В данном исследовании эта методика рассматривалась как эмоционально-стрессовая психокоррекция с гипервентиляционной нагрузкой.

Первому сеансу предшествовала ознакомительная беседа информационно-познавательного характера, в которой пациентам излагались основы трансперсональной психологии и психотерапии, участники знакомились с картографией психики, примерами переживаний других участников сессий. Перед проведением сеансов рекомендуется хороший полноценный отдых (сон), запрещено употребление алкогольных напитков и по возможности седативных препаратов. В последующем такие беседы перед сеансами проводились избирательно с целью

Таблица 1

Показания к эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционной нагрузкой у комбатантов в проведенном исследовании

Код по МКБ-10	Нозологический диагноз по МКБ-10	Синонимы нозологической группы*
F43	Реакция на тяжелый стресс и нарушения адаптации	
F43.1	Посттравматическое стрессовое расстройство	Боевое изнурение. Синдром катастроф. Синдром переживших бедствие. Травматическая замкнутость. Травматический невроз. Травматический синдром
F43.2	Расстройство приспособительных реакций	Расстройство психической адаптации
F43.8	Другие реакции на тяжелый стресс	
F43.9	Реакция на тяжелый стресс неуточненная	
F45.3	Соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы	Кардионевроз. Сердечно-сосудистый невроз. Синдром нейроциркуляторной дистонии. Синдром вегетососудистой дистонии. Соматовегетативное расстройство. Соматовегетативные осложнения
F48	Другие невротические расстройства	
F48.0	Неврастения	Астенический синдром. Астеническая форма неврастении. Астеноневротическое расстройство. Астеноневротическое состояние. Грипп молодых трудоголиков. Неврастенические нарушения. Неврастенические состояния. Неврастенический синдром. Невротические реакции. Церебрастения
F48.8	Другие невротические расстройства	

Примечание. * – синонимы нозологической группы приведены по источнику https://www.rlsnet.ru/mkb_tree.htm.

уточнения отдельных моментов, от которых может зависеть характер переживаний. Непосредственно перед каждым последующим сеансом с участниками проводился предварительный инструктаж об условиях его проведения.

Сеансы проводились в звукоизолированном зале, в положении лежа на спине на полумягких матрасах с валиками под ноги и голову, в сопровождении ситтера. Перед началом сеанса давалась инструкция: «Закрыть глаза и сосредоточиться на ощущениях в теле», затем предлагалось поддерживать активное глубокое дыхание в такт ритмичной музыке, которая сопровождала сеанс. Музыка вначале была более громкой и ритмичной, в последующем сменялась тихой и спокойной. Сеансы проводились в группах от 3 до 10 участников 2–3 раза в неделю продолжительностью от 1 до 2 ч.

После каждого сеанса проводилось обязательное обсуждение состоявшегося сеанса с анализом телесных, эмоциональных проявлений и их связи с проблемами жизненного опыта участников.

Из всех комбатантов в сеансах эмоционально-стрессовой медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой однократно участвовали 20 %, двукратно – 37 %, 3 раза и более – 43 % лиц, получавших данный вид психотерапии.

При клиническом анализе определяли частоту реакций пациентов в ходе и после проведения психокоррекционных сеансов. На основе клинической практики были сформулированы показания и противопоказания к его применению у летного состава и комбатантов.

Результаты и обсуждение

Во время обследования и наблюдения пациентов с проявлениями предклинической патологии клинический анализ их состояния показал соответствие по основным диагностическим критериям известным пограничным психическим расстройствам (см. табл. 1), таким, как «Реакция на тяжелый стресс и нарушения адаптации» (F43), «Соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы» (F45.3), «Невротические расстройства» (F48) в виде неврастении, астенического синдрома и астеноневротических состояний. Частота психоэмоциональных нарушений у ветеранов составляла: 34 % – раздражительность, 27 % – вспыльчивость, 18 % – агрессивность, 45 % – эмоциональная неустойчивость, 28 % – симптомы вегетососудистой дистонии, 56 % – утомляемость, 33 % – нарушение сна. Значительно реже отмечались психоорганические синдромы – 7 %, синдромы нарушенного сознания – 17 %. Структура нарушений в большей части случаев характеризовалась уровнем пограничных нервно-психических расстройств.

В процессе проведения сеансов у участников наблюдались следующие проявления, выраженные в разной степени: нарушения чувствительности в виде различных парестезий – онемение, покалывание, ощущение жжения, чувство «ползания мурашек» в дистальных отделах конечностей (карпо-педальный спазм) – 96 %, мышечно-тонические феномены (спазмы, тонические судороги) – 53 %. Как парестезии, так и судороги возникали преимущественно в области лица и дистальных отделов конечностей (кистей и стоп), значительно реже они носили генерализованный характер – 12 %. У отдельных лиц во время сеансов отмечались болевые ощущения в груди (3 %), животе (2 %), головные боли (9 %), очевидно связанные с напряжением и спазмами различной локализации. Изредка наблюдались психические реакции в виде тревожных и фобических состояний (7 %). Поведение 64 % участников в течение сеансов было спокойным, в 36 % случаев характеризовалось беспокойством. У некоторых участников (6 %) измененное состояние сознания сопровождалось ощущением нереальности происходящего – они описывали изменения восприятия пространства, времени, собственной личности. По нашим наблюдениям, ни в одном случае пациенты не описывали переживания перинатального характера. В конце сеансов у 57–72 % участников после периода локальных телесных ощущений и общих эмоциональных реакций наступало глубокое и выраженное расслабление, иногда переходящее в сон.

В значительной части случаев можно было говорить о хорошем психотерапевтическом эффекте после проведения процедур: пациенты отмечали состояние выраженного приятного спокойствия (63 %), улучшение настроения (74 %), уменьшение (34 %) или исчезновение (21 %) других ранее беспокоивших их психосоматических симптомов и проявлений нервно-психических расстройств. Следует отметить, что эффективность сеансов не была прямо связана с их кратностью. Выраженное значительное улучшение у 48 % наступало уже с первого сеанса, у 52 % – постепенно, в процессе нескольких сеансов. За все время проведения психокоррекционных сеансов у пациентов не было отмечено каких-либо осложнений.

Как видно из табл. 1, основными показаниями для проведения сеансов эмоционально-стрессовой медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой у лиц летного состава и комбатантов с посттравматическими стрессовыми расстройствами были невротические состояния с доминирующими аффективными нарушениями (астено-депрессивные, тревожно-депрессивные состояния и др.), которые преобладали среди психических расстройств у ветеранов локальных военных конфликтов и региональных войн.

К противопоказаниям для проведения сеансов с гипервентиляционными нагрузками относили заболевания в стадии обострения сердечно-сосудистой системы (ишемическая болезнь сердца, инсульты и инфаркты на момент исследования и в анамнезе), органов дыхания (хроническая обструктивная болезнь легких) и органов пищеварения, органические заболевания мозга (эпилепсия, выраженные сосудистые нарушения, проявления субарахноидального кровоизлияния, ликворогипертензионный синдром), пароксизмальные расстройства психики и психозы.

В современных условиях применение методик психокоррекции у летного состава возможно в процессе медико-психологической реабилитации [14], которая на основании показаний и при отсутствии противопоказаний проводится после:

– участия более 30 сут в боевых действиях, выполнении мероприятий чрезвычайного положения, в ликвидации последствий стихийных бедствий и в других чрезвычайных ситуациях;

– участия в походе (выполнении специальных задач) военнослужащих инженерно-технического состава корабельной авиации более 60 сут, военнослужащих летного состава корабельной авиации – более 30 сут;

– воздействия экстремальных факторов при авариях, катастрофах летательных аппаратов;

– выполнения более 70 % от установленной нормы годового налета часов;

– выполнения космических полетов;

– прохождения военной службы в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях, других местностях с неблагоприятными климатическими условиями более одного календарного года.

Проведенный анализ (табл. 2) позволяет уточнить, при каких нозологических диагнозах из общего перечня диагнозов, при которых военнослужащие из числа летного состава направляются на медико-психологическую реабилитацию [15], можно рекомендовать, а при каких – нецелесообразно использовать метод эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционной нагрузкой.

В качестве показаний к использованию методики у лиц летного состава, прибывающих для медико-психологической реабилитации в военные санатории, профилактории и госпитали рассматриваются посттравматическое стрессовое расстройство, расстройство приспособительных реакций, нервозность, состояние тревоги в связи с неудачами и несчастьями, стрессовые состояния (психоэмоциональный стресс, стрессовые ситуации и повышенные стрессовые нагрузки, стрессы повседневной жизни, хронический стресс, длительные эмоциональные нагрузки, нарушение эмоционально-волевой сферы, недомогание и утомляемость, ряд проблем, связанных с трудностями организации

Таблица 2

Показания к медико-психологической реабилитации военнослужащих и возможность использования методики эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционными нагрузками

Код по МКБ-10*	Нозологический диагноз	Синонимы нозологической группы**	Использование методики эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционной нагрузкой
F43	Реакция на тяжелый стресс и нарушения адаптации	Состояние стрессовое. Стрессовые расстройства. Расстройство адаптации	Не показано
F43.0	Острая реакция на стресс	Боевое изнурение. Синдром катастроф. Синдром пережитых бедствие. Травматическая замкнутость. Травматический невроз. Травматический синдром. Посттравматическое стрессовое расстройство	Показано
F43.1	Посттравматическое стрессовое расстройство		
F43.2	Расстройство приспособительных реакций	Расстройство психической адаптации	Показано

F43.8	Другие реакции на тяжелый стресс		Не показано
F43.9	Реакция на тяжелый стресс неуточненная		Не показано
R45	Симптомы и признаки, относящиеся к эмоциональному состоянию	Нарушения эмоциональной сферы	
R45.0	Нервозность	Напряжение нервное. Психическое напряжение. Состояние напряженности. Состояния напряжения. Нервные расстройства. Психоэмоциональное напряжение. Эмоциональная напряженность. Чувство внутреннего напряжения. Психоэмоциональное напряжение в стрессовых ситуациях. Реакции нервного напряжения. Внутреннее напряжение. Состояние постоянного психического напряжения	Показано
R45.1	Беспокойство и возбуждение	Ажитация. Беспокойство. Взрывчатая возбудимость. Внутреннее возбуждение. Возбуждение Возбуждение острое. Возбуждение психомоторное. Гипервозбудимость. Двигательное возбуждение. Нервное возбуждение. Ночное беспокойство. Острое психическое возбуждение. Пароксизм возбуждения. Перевозбуждение. Повышенная нервная возбудимость. Повышенная эмоциональная возбудимость. Повышенное возбуждение. Психическое возбуждение. Психомоторная ажитированность. Психомоторное возбуждение. Психомоторное возбуждение эпилептического характера. Психомоторный пароксизм. Психомоторный припадок. Эмоциональное возбуждение	Не показано Не показано
R45.2	Состояние тревоги в связи с неудачами и несчастьями		Показано

продолжение таблицы 2

Код по МКБ-10*	Нозологический диагноз	Синонимы нозологической группы**	Использование методики эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционной нагрузкой
R45.3	Деморализация и апатия	Апатико-абулическое явление. Апатия. Апатоабулические состояния. Апатоабулическое расстройство. Безразличие. Безынициативность. Вялоапатическое состояние. Дефицит побуждений и мотиваций. Отсутствие / снижение инициативы. Отсутствие эмоциональности и уход от общения. Ощущение малоценности. Снижение мотивации	Не показано
R45.4	Раздражительность и озлобление	Невроз с повышенной раздражительностью. Вспышки гнева, гнев. Озлобление. Повышенная раздражительность. Раздражительность. Раздражительность при неврозах. Раздражительность при психопатических нарушениях. Дисфория	Не показано
R45.5	Враждебность		Не показано
R45.6	Физическая агрессивность	Агрессивность. Агрессивные состояния. Агрессия Агрессивное поведение. Аутоагрессия	Не показано
R45.7	Состояние эмоционального шока и стресса неуточненное	Воздействие стрессовых факторов. Воздействие экстремальных ситуаций. Нервно-психические стрессы. Профессиональный стресс. Психоэмоциональная перегрузка и стресс. Психоэмоциональный стресс. Стресс. Стрессовая нагрузка. Стрессовое состояние. Стрессовые ситуации. Стрессы повседневной жизни. Хронический стресс. Длительные эмоциональные нагрузки. Психоэмоциональное напряжение в стрессовых ситуациях	Показано

R45.8	Другие симптомы и признаки, относящиеся к эмоциональному состоянию	Состояние растерянности. Нарушение эмоционально-волевой сферы. Нарушения эмоциональной сферы. Тоска. Отсутствие эмоциональности и уход от общения. Чувство тревоги. Аффективная тупость. Подавленное настроение с элементами тревожности	Показано
R53	Недомогание и утомляемость	Синдромы хронической усталости, послевирусной слабости, иммунной дисфункции	Показано
Z73	Проблемы, связанные с трудностями организации нормального образа жизни	Синдром менеджера	
Z73.0	Переутомление	Психическая усталость. Снижение физической работоспособности спортсменов. Снижение энергетического статуса организма. Общая слабость	Показано
Z73.1	Акцентуированные личностные черты		Показано
Z73.2	Недостаточность отдыха и расслабления	Психическая усталость. Высокие психические нагрузки. Состояние усталости	Не показано
Z73.3	Стрессовое состояние, не классифицированное в других рубриках	Психологический и физический стресс. Высокие психические нагрузки. Предстрессовое состояние. Психологический стресс при авиаполетах	Показано
Z73.4	Неадекватные социальные навыки, не классифицированные в других рубриках	Девиантное поведение. Делинквентное поведение	Не показано
Z73.5	Конфликт, связанный с социальной ролью, не классифицированный в других рубриках		Показано
Z73.6	Ограничения деятельности, вызванные снижением или утратой трудоспособности	Общая слабость. Психическая усталость. Синдром снижения работоспособности и физического перенапряжения. Снижение двигательной активности. Снижение работоспособности. Снижение физической работоспособности. Сниженная работоспособность организма. Сниженная работоспособность при работе в экстремальных ситуациях	Не показано
Z73.8	Другие проблемы, связанные с трудностями в поддержании жизненного уклада		Показано
Z73.9	Проблема, связанная с трудностью в поддержании жизненного уклада, неуточненная		Показано

Примечание. * – Приказ министра обороны РФ от 27 января 2017 г. № 60 «О медико-психологической реабилитации военнослужащих». Приложение 2. «Перечень показаний к медико-психологической реабилитации и соответствующая им продолжительность медико-психологической реабилитации» [15]; ** – синонимы нозологической группы приведены по источнику https://www.rlsnet.ru/mkb_tree.htm.

нормального образа жизни, т.е. ситуации, которые требуют от пациента мобилизации ресурсов психики для разрешения внутренних противоречий.

Применение методики не показано при острых стрессовых реакциях, беспокойстве и возбуждении, ажитированном состоянии (враждебность, агрессивность, аутоагрессия), раздражительности и озлобленности или состояниях с астенонегативной симптоматикой (апатико-абулические состояния, безразличие и безынициативность, отсутствие инициативы и эмоциональности, уход от общения и др.). В случае недостаточного отдыха, психической усталости процедура не показана, так как у пациента развивается физиологический сон, что исключает психокоррекционное воздействие.

Психокоррекционные сеансы в ходе исследования необходимо рассматривать как сеансы эмоционально-стрессовой психотерапии с гипервентиляционной нагрузкой. При прохождении летным составом стационарной врачебно-летной комиссии краткосрочный (3 мин) тест с гипервентиляцией в сочетании с электроэнцефалографией (ЭЭГ) применяется в качестве функционального исследования для оценки устойчивости к судорожной активности головного мозга [16]. Выявленное при этом повышение степени ЭЭГ активности является противопоказанием к применению данного метода, так как он может спровоцировать судорожные проявления у пациента.

В процессе и после проведения методики эмоционально-стрессовой психотерапии с гипервентиляционной нагрузкой у отдельных лиц возможны проявления временной дезориентации и деперсонализации. Это важно учитывать медицинскому персоналу в реабилитационной практике летного состава, чтобы предупредить возможность развития таких явлений в последующем при летной работе. В процессе гипервентиляционной пробы могут отмечаться случаи депрессии сегмента ST, однако подобные эпизоды у лиц без признаков ишемической болезни сердца не имеют серьезного диагностического значения и, как правило, не связаны с ишемией миокарда [16], но также подлежат динамическому врачебному наблюдению.

Перечисленные возможные клинические реакции при использовании данного коррекционного метода свидетельствуют о том, что проведение сеансов эмоционально-стрессовой психотерапии с гипервентиляционной нагрузкой требует специализированной подготовки медицинского персонала, тщательного отбора пациентов, учитывая показания и противопоказания к их проведению.

У части лиц летного состава, сталкивающихся с напряженными факторами профессиональной деятельности, у комбатантов (участников локальных военных конфликтов и региональных войн) вследствие воздействия социальных факторов риска при определенных акцентуациях характера и индивидуальных особенностях личности могут формироваться деформирующие типологию поведения человека ригидные доминантные психические состояния, разрушающие самоценность смысловых сторон мотивации к летному труду и снижающие адаптационный потенциал личности летчика в целом. Традиционных методов личностно-ориентированной рациональной психотерапии, аутогенной тренировки, мышечной релаксации оказывается недостаточно и требуется использование дополнительно методики курсовой эмоционально-стрессовой психокоррекции с гипервентиляционной нагрузкой на подсознательном уровне с учетом показаний и противопоказаний.

Эта методика высокоэффективна при решении внутриличностных конфликтов у летного состава и комбатантов, однако может сопровождаться клинико-физиологическими реакциями на гипервентиляцию в процессе и после ее проведения, что требует динамического врачебного наблюдения за пациентом. В связи с этим методика не может выполняться самостоятельно заинтересованными лицами, в отличие от методик аутогенного тренинга и прогрессирующей мышечной релаксации по Джекобсону. Она должна проводиться под контролем подготовленного медицинского персонала в условиях стационара, санаторно-курортного учреждения, профилактория, специализированных реабилитационных центров, а также может по показаниям применяться при реабилитации летного состава во время стационарной врачебно-летной комиссии.

Выводы

1. Установленный психотерапевтический эффект после проведения процедуры эмоционально-стрессовой медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой позволяет охарактеризовать ее как эффективный метод реабилитации лиц летного состава и комбатантов (участников локальных военных конфликтов и региональных войн).

2. Метод эмоционально-стрессовой медико-психологической коррекции с гипервентиляционной нагрузкой хорошо сочетается с другими формами реабилитации и целесообразен для проведения в условиях стационаров, санаторно-курортных учреждений, профилакториев, специализированных реабилитационных центров у пациентов с широким спектром нервно-психических расстройств.

3. Использование установленных показаний и противопоказаний для применения метода медико-психологической коррекции в сочетании с функциональной гипервентиляционной нагрузкой позволяет избежать возможных осложнений при его использовании.

Список литературы

1. *Близнюк Л.И.* Посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) у комбатантов: клиника, диагностика, коррекция // Воен. мед. 2006. № 1. С. 31–40.

Bliznyuk L.I. Post-traumatic stress disorder (PTSD) in combatants: clinic, diagnosis, correction // Voennaya meditsina. 2006. № 1. P. 31–40.

2. *Кадыров Р.В.* Посттравматическое стрессовое расстройство (PTSD): состояние проблемы, психодиагностика и психологическая помощь. СПб., 2012.

Kadyrov R.V. Post-traumatic stress disorder (PTSD): state of the problem, psychodiagnostics and psychological assistance. St.-Petersburg, 2012.

3. *Погосов А.В., Сочивко Ю.Н.* Медицинские и социальные последствия посттравматических стрессовых расстройств у комбатантов // Курский науч.-практ. вестник «Человек и его здоровье». 2012. № 1. С. 158–163.

Pogosov A.V., Sochivko Yu.N. Medical and social consequences of post-traumatic stress disorder in combatants // Kurskiy nauchno-prakticheskiy vestnik «Chelovek i ego zdorov'e». 2012. № 1. P. 158–163.

4. *Hines L. et al*. Posttraumatic stress disorder post Iraq and Afghanistan: prevalence among military subgroups // Can. J. Psychiatry. 2014. V. 59. Is. 9. P. 468–479. DOI: 10.1177/070674371405900903.

5. *Иванов И.В., Юдин А.Б., Булавин В.В., Писаренко Ю.Э.* Характеристика психологического статуса военнослужащих, участвовавших в боевых действиях, и направления коррекции их функционального состояния // Психофизиология профессионального здоровья человека: Матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2012. С. 263–265.

Ivanov I.V., Yudin A.B., Bulavin V.V., Pisarenko Yu.E. Characteristics of the psychological status of servicemen who participated in hostilities, and the direction of correction of their functional state // Psychophysiology of professional human health: Materials All-Russian Scientific and Practical Conference. St.-Petersburg, 2012. P. 263–265.

6. *Болучевская В.В., Куликова Д.Н.* Посттравматическое стрессовое расстройство: риск возникновения у военнослужащих, принимавших участие в военных конфликтах // Форум. Сер.: Гуманитарные и экономические науки. 2018. № 2 (14). С. 136–140.

Boluchevskaya V.V., Kulikova D.N. Post-traumatic stress disorder: the risk of occurrence in military personnel who took part in military conflicts // Forum. Seriya: Gumanitarnye i ekonomicheskie nauki. 2018. № 2 (14). P. 136–140.

7. *Гринь Е.В.* Коморбидность аффективных расстройств и болевого синдрома у пациентов с посттравматическим стрессовым расстройством // Журнал Гродненского гос. мед. ун-та. 2020. Т. 18. № 3. С. 288–291.

Gryn E.V. Comorbidity of affective disorders and pain syndrome in patients with post-traumatic stress disorder // Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta. 2020. V. 18. № 3. P. 288–291.

8. *Погодина М.Г., Косенко В.Г., Агеев М.И. и др.* Особенности личностных характеристик и уровня дистресса у лиц, страдающих посттравматическим стрессовым расстройством с коморбидными психическими расстройствами // Социальная и клиническая психиатрия. 2019. Т. 29. № 2. С. 22–25.

Pogodina M.G., Kosenko V.G., Ageyev M.I. et al. Personality characteristics and distress levels in patients with post-traumatic stress disorder and comorbid mental disorders // Sotsial'naya i klinicheskaya psikhiatriya. 2019. V. 29. № 2. P. 22–25.

9. *Курасов Е.С., Марченко А.А., Шамрей В.К. и др.* Психотерапевтическое лечение посттравматических стрессовых расстройств у комбатантов // Вестник психотерапии. 2018. № 66 (71). С. 19–34.

Kurasov E.S., Marchenko A.A., Shamrey V.K. et al. Psychotherapeutic treatment of posttraumatic stress disorders in combatants // Vestnik psikhoterapii. 2018. № 66. P. 19–34.

10. *Юсупов В.В., Овчинников Б.В., Корзунин В.А. и др.* Современное состояние и перспективы развития медико-психологического сопровождения военнослужащих Вооруженных Сил // Воен.-мед. журнал. Т. 337. 2016. № 1. С. 22–28.

Yusupov V.V., Ovchinnikov B.V., Korzunin V.A. et al. The current state and prospects for the development of medical and psychological support for military personnel of the Armed Forces // Voenno-meditsinskiy zhurnal. 2016. V. 337. № 1. P. 22–28.

11. Гроф С., Уилбер К., Веховски А., Тарт Ч. Практика холотропного дыхания: Метод. рекомендации для слушателей курса «Трансперсональная психотерапия». М., 2001.

Grof S., Wilber K., Vehovski A., Tart Ch. The practice of holotropic breathing: Methodical recommendations for the students of the course «Transpersonal psychotherapy». Moscow, 2001.

12. *Фотина Ю.В.* Трансперсональная психотерапия невротических и соматоформных расстройств // Психическое здоровье. 2008. Т. 6. № 7. С. 39–44.

Fotina Yu.V. Transpersonal psychotherapy of neurotic and somatoform disorders // Psikhicheskoe zdorov'e. 2008. V. 6. № 7. P. 39–44.

13. *Иванов И.В., Желтый О.П., Ищенко П.В.* Использование метода специальных дыхательных и идеомоторных упражнений для психокоррекции адаптационных нарушений у летного состава // Авиакосм. и экол. мед. 2018. Т. 52. № 3. С. 54–61.

Ivanov I.V., Zheltyi O.P., Ishchenko P.V. Use of the method of special breathwork and ideomotor exercises for psychocorrection of adaptation-related disorders in flying personnel // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2018. V. 52. № 3. P. 54–61.

14. Приложение № 1 к приказу министра обороны РФ от 27 января 2017 г. № 60 «Перечень категорий военнослужащих, подлежащих при наличии показаний медико-психологической реабилитации». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71523460/#review.

Annex № 1 to the Order of the Minister of Defense of the Russian Federation, January 27, 2017 № 60 «List of categories of military personnel subject to medical and psychological rehabilitation if there are indications». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71523460/#review.

15. Приложение № 2 к приказу министра обороны РФ от 27 января 2017 г. № 60 «Перечень показаний к медико-психологической реабилитации и соответствующая им продолжительность медико-психологической реабилитации». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71523460/#review

Annex № 2 to the Order of the Minister of Defense of the Russian Federation, January 27, 2017 № 60 «List of categories of military personnel subject to medical and psychological rehabilitation if there are indications». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71523460/#review.

16. *Соколов Ю.А., Котко А.Д., Пантюхов А.П.* Врачебно-летная экспертиза: Курс лекций. Минск, 2014.

Sokolov Yu.A., Kotko A.D., Pantyukhov A.P. Medical flight examination: a Course of lectures. Minsk, 2014.

Поступила 02.09.2021

MEDICO-PSYCHOLOGICAL CORRECTION OF EMOTIONAL STRESS WITH HYPERVENTILATION: ASSESSMENT OF CLINICAL EFFECTS AND INDICATIONS FOR APPLICATION TO PILOTS AND COMBATANTS

Ivanov I.V.[1, 2], Milanin A.A.[3], Zhelty O.P.[4], Stas Yu.V.[3]

[1]Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)
[2]State Scientific-Research Test Institute of Military Medicine Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg
[3]State Budgetary Institution of Moscow «Scientific and Practical Rehabilitation Center»
[4]12th Advisory and Diagnostic Center of Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

We analyzed psychotherapeutic effectiveness of and individual clinical reactions to hyperventilation sessions used for emotional stress correction in 517 patients including 211 pilots and 306 war veterans at the age of 22 to 52 years.

The hyperventilation method was recommended for pilots' treatment in hospitals and rehabilitation centers. However, the method may provoke convulsive activities in the brain and personal disorientation and, therefore, should be prescribed on the clinical evidence of benefit to an individuum with post-traumatic stress disorders, and lack of contraindications.

Key words: post-traumatic stress disorder, medico-psychological correction, hyperventilation session, indications and counterindications, psychotherapy, clinical reaction to psychotherapy, military pilots, war veterans.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 54–63.

УДК 613.693

БАРОКАМЕРНЫЕ «ПОДЪЕМЫ» КАК МЕТОД ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛИЦ ОПАСНЫХ ПРОФЕССИЙ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ ЗАДАЧИ В УСЛОВИЯХ ВЫРАЖЕННЫХ СТЕПЕНЕЙ ГИПОКСИИ

Филатов В.Н., Шишов А.А., Дворников М.В., Шишкин А.Н., Рыжов Д.И., Никифоров Д.А.

Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва

E-mail: an-shishkin43@yandex.ru

В статье обобщен опыт психофизиологической подготовки в барокамере сводной группы высотного (10 000 м) десантирования в условиях Крайнего Севера. Проведено барокамерное обследование 29 десантников по методикам «подъемов» на высоты 5000–6000 и 10 000 м. Переносимость умеренных и средних степеней гипоксии допущенной к подъемам группы была оценена как «нормальная». Барокамерные «подъемы» на 10 000 м при использовании специального кислородного оборудования и защитного снаряжения показали высокую эффективность в условиях высот до 10 000 м. Показана «нормальная» переносимость больших степеней гипобарии, проведена отработка практических навыков использования средств индивидуальной защиты от высотных стресс-факторов.

Ключевые слова: барокамерные «подъемы», психофизиологическая подготовка, высотное десантирование, гипоксия.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 64–72.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-64-72

В связи с освоением новых видов боевого применения подразделений Воздушно-десантных войск (ВДВ): десантирование с высот до 10 000 м с большой (до 50 м/с) и малой (4 м/с) скоростью парашютирования – возрастает актуальность медицинского обеспечения данного вида профессиональной деятельности десантников.

Известно, что на высоте вследствие снижения общего барометрического давления и парциального давления кислорода развиваются такие опасные состояния, как высотная гипоксия и высотные декомпрессионные расстройства (ВДР). Высотная гипоксия – нарушения функций и структур организма, возникающие на высоте как следствие снижения парциального давления кислорода во вдыхаемом и альвеолярном воздухе. Критическая, терминальная стадия гипоксического состояния может наступать на высотах свыше 8000 м при дыхании воздухом через несколько минут или даже секунд. Кроме того, низкая температура окружающего воздуха (около -56 °С) существенно повышает риск развития гипотермии, а в сочетании с высокой скоростью движения воздуха – обморожений открытых участков тела. В этой связи особое внимание было уделено психофизиологической подготовке десантников-высотников в барокамере к воздействию высотных стресс-факторов.

По скоротечности развития нарушения сознания наиболее частые высотные нарушения – высотная гипоксия и ВДР.

Ранее специалистами в области высотной физиологии были проведены исследования и разработки по вопросам психофизиологической подготовки лиц опасных профессий, особенно летного состава, к воздействию факторов высотного полета. В то же время, вопросы медицинского обеспечения десантирования с 10 000 м групп десантников-высотников до настоящего времени не поднимались, так как задача десантирования с 10 000 м в условиях Арктики в составе подразделения не ставилась. Нормативно-правовая база, регламентирующая такие мероприятия, отсутствует.

Учитывая важность успешного выполнения поставленной задачи, для десантирования был отобран личный состав из наиболее подготовленных представителей ВДВ.

С целью психофизиологической подготовки к высотному десантированию был выбран наиболее специфичный метод, успешно зарекомендовавший себя в авиации, – наземная подготовка при моделировании высотных стресс-факторов в барокамере с использованием защитного высотного снаряжения.

В группу высотных декомпрессионных расстройств на высотах до 10 000 м входят барокавепатии (высотный метеоризм, бароотопатия, баросинусопатия, бародонталгия, баротравма легких) и высотная декомпрессионная болезнь (ВДБ) [1–3].

Барокавепатии характеризуются тем, что нарушается выравнивание давления в газосодержащих полостях тела с изменяющимся в полете внешним давлением. Сопровождаются они сильным болевым синдромом и даже повреждениями органов (внутреннего уха, легких), что может приводить к

существенному снижению функционального состояния, вплоть до полной утраты боеспособности.

Высотная декомпрессионная болезнь – патологическое состояние, развивающееся на высоте при понижении давления вследствие образования в крови, лимфе и тканях организма газовых пузырьков. Это гораздо более опасное патологическое состояние. При развитии данного патологического состояния возможны самые разнообразные последствия, вплоть до инвалидизации и летального исхода. Учитывая специфику задач десантников, это приобретает особую актуальность, так как физическая нагрузка на фоне декомпрессионной болезни лишь усугубляет ее течение [4, 5].

Кроме того, холодовой фактор (температура за бортом на высоте 10 000 м -56 °С) также должен учитываться при подготовке для исключения получения обморожения открытых участков тела и развития гипотермии организма в целом.

Целью данной работы явилось обоснование психофизиологической подготовки в барокамере десантников-высотников к десантированию с высоты 10 000 м в условиях Арктики.

Достижение указанной цели предполагало решение следующих задач:

1) теоретическая подготовка десантников-высотников к действию экстремальных высотных факторов;

2) определение индивидуальной переносимости десантниками-высотниками гипоксии умеренной и средней степени (5000 и 6000 м) в барокамере;

3) оценка индивидуальной предрасположенности к развитию декомпрессионных нарушений (высотной декомпрессионной болезни, барокавепатий);

4) практическое изучение в барокамере действий стресс-факторов высоты, эффективности защитных характеристик индивидуального снаряжения десантников-высотников.

Методика

В соответствии с целями и задачами работы применялись следующие методики барокамерных «подъемов»:

– методика подъемов на 5000–6000 м;
– подъем в барокамере до 10 000 м.

Барокамерные «подъёмы» относятся к группе специальных исследований в авиационно-космической медицине [6].

Перед барокамерными подъемами летный состав проходил обследование в объеме предполетного медицинского осмотра [6, 7]. На этом этапе было отстранено 3 человека.

«Подъемы» проводились в барокамере МГБ «Эдельвейс» на базе 859 ЦБП и ПЛС МА ВМФ (г. Ейск), оборудованной системой дистанционного управления аварийной подачи кислорода и аппаратурой для регистрации ЭКГ (ЧСС). В высотных обследованиях одновременно принимали участие не более 4 и не менее 2 человек. Один из них назначался старшим, связь осуществлялась по самолетному переговорному устройству либо по ларингофонам.

Всего в результате работы было обследовано 29 человек подразделения высотного десантирования. Возраст обследованных специалистов от 24 до 52 лет. Медианное значение составило 36,5 года.

Подъем на 5000–6000 м проводился по типовой методике, представленной в Приказе Минобороны РФ от 27 апреля 2009 г. № 265 («Об утверждении Федеральных авиационных правил медицинского обеспечения полетов государственной авиации») [8].

Ознакомительно-тренировочные «подъемы» на 5000–6000 м прежде всего подразумевали проведение психофизиологической подготовки личного состава к распознаванию гипоксии и мерам ее устранения, а также решали вопросы выявления скрытой патологии у обследуемых [7–10].

Подъем с земли до высоты 5000 м и от 5000 до 6000 м проводился со скоростью 15–20 м/с при дыхании воздухом (кислородные вентили в барокамере закрыты, маски подсоединены к кислородным приборам). Длительность пребывания на каждой высоте (5000 и 6000 м) без дополнительного кислородного обеспечения составляла 5 мин, время подъема с высоты 5000 до 6000 м составляло 1 мин, периодически регистрировались ЧСС, показатели сатурации и артериального давления.

В конце пребывания на высоте 6000 м десантники-высотники по команде врача выполняли практические действия по устранению гипоксического состояния: открывали приборный кислородный вентиль, переходили на дыхание 100%-ным кислородом (тумблер на «100 % O_2»), плотно фиксировали кислородные маски на лице, спуск до земли проводился со скоростью 15–20 м/с.

Досрочное прекращение «подъема» (восстановление кислородного обеспечения до истечения 11-минутного пребывания на высотах 5000–6000 м) осуществлял врач путем дистанционного включения аварийной подачи кислорода только при пониженной переносимости высотной гипоксии: активные жалобы на плохое самочувствие, неадекватность реакции сердечно-сосудистой системы на гипоксию (учащение пульса более чем на 40 уд/мин, брадикардия, падение артериального давления), выраженное ухудшение умственной работоспособности (нарушение внимания, оперативной и долговременной памяти).

После практического ознакомления десантника-высотника с действием на организм острой высотной гипоксии и обучения мерам по ее устранению одновременно давалась оценка переносимости действия гипоксии умеренной и средней степени.

Неадекватность адаптационных реакций на гипоксическое воздействие со стороны сердечно-сосудистой системы является достоверным признаком сниженной адаптоспособности организма [11, 12].

Переносимость гипоксии оценивалась как нормальная (программа барокамерного «подъёма» выполнена полностью) или пониженная (досрочная подача кислорода из-за ухудшения общего состояния) [7].

Перед «подъемом», на высоте 5000 м, 6000 м и после подъема выполнялось проведение пробы устного счета.

С целью получения дополнительных данных до и после барокамерного обследования выполнялись функциональные нагрузочные пробы Штанге и Генчи.

Проведение психофизиологической подготовки кандидатов на участие в десантировании с высоты 10 000 м подразумевало:

– теоретическую подготовку по вопросам высотной физиологии и получению знаний о действии всех опасных факторов десантирования с высот до 10 000 м – гипоксической гипоксии выраженных степеней, гипобарии с высоким риском развития высотной декомпрессионной болезни (ВДБ), гипотермии до -56 °С, вызывающей как общее охлаждение, так и локальное обморожение;

– практическое ознакомление с действием высотных (до 10 000 м) стресс-факторов в барокамере, обучение навыкам работы с кислородным оборудованием «Окси-высота» и индивидуальным снаряжением, а также с их защитными характеристиками [13].

Проводились подъемы на высоту 10 000 м в барокамере, оборудованной кислородно-дыхательной аппаратурой, использование которой предполагалось на борту самолета во время высотного десантирования. Десантники-высотники использовали индивидуальное кислородное оборудование «Окси-высота». Перед подъемом проводилась проверка кислородного оборудования и десатурация в целях профилактики развития высотной декомпрессионной болезни.

К высотным испытаниям допускался личный состав, получивший удовлетворительный результат по переносимости гипоксии умеренной и средней степеней («подъем» в барокамере без дополнительного кислородного обеспечения на высоты 5000–6000 м). «Подъем» проводился в индивидуально выбранном и подогнанном снаряжении не более 4 и не менее 2 человек одновременно. Связь осуществлялась по переговорному устройству.

Перед высотными испытаниями личный состав проходил инструктаж о целях предстоящего «подъема», циклограмме подъема, особенностях работы кислородно-дыхательной аппаратуры и снаряжения, возможных декомпрессионных нарушениях, признаках проявления и мерах по их устранению, а также был проинформирован о наиболее важных моментах профилактики ВДБ.

Проводилась 45-минутная десатурация (дыхание 100%-ным кислородом в барокамере на земле и в процессе «подъема» до 10 000 м) от кислородного баллона большого объема с последующим переключением на индивидуальные кислородные приборы на достигнутой высоте (отработка навыка с имитацией порядка действий по переходу на индивидуальное кислородное обеспечение на борту самолета перед прыжком) [13].

«Подъем» до высоты 10 000 м осуществлялся со скоростью 10–15 м/с. Во время площадки производилась регистрация частоты сердечных сокращений, артериального давления, сатурации. Десантники докладывали врачу о самочувствии, давлении в кислородных баллонах, основные дискомфортные ощущения, отмечали возможность выполнения рабочих движений и ведения связи по переговорному устройству. Длительность площадки составляла 10 мин.

Спуск с высоты 10 000 м осуществлялся со скоростью 4 м/с до земли (имитация спуска с парашютом), а также со скоростью 50 м/с до 4000 м и далее со скоростью 4 м/с до земли.

Следует отметить, что во время «подъемов» проводился постоянный контроль уровня кислорода в баллонах с целью определения скорости его расхода и достаточности кислородного обеспечения при разных условиях десантирования (обычный прыжок либо раскрытие парашюта «из-под крыла»).

Поскольку на указанных высотах проявление высотных стресс-факторов примерно сопоставима, то увеличение высоты «подъема» до 10 000 м в интересах соблюдения условий для психофизиологической подготовки максимально близких к реальному десантированию также показало свою безопасность.

Для оценки умственной работоспособности выполнялась проба устного счета на 1-й и 45-й минутах десатурации, на высоте 10 000 м и после подъема.

До и после «подъема» также проводились функциональные нагрузочные пробы с задержкой дыхания Штанге и Генчи [14, 15].

Результаты и обсуждение

При «подъеме» в барокамере по результатам проведения на 5000–6000 м переносимость умеренных и средних степеней гипоксии у всех десантников была оценена как «нормальная».

Анализ результатов проведенных проб «счет–письмо» представлен в табл. 1 и 2.

Количество решенных примеров устного счета достоверно повысилось при достижении условий умеренной гипоксии в условиях гипобарии («высота» 5000 м), на «высоте» 6000 м снизилось до

Таблица 1

Количество решенных примеров в пробе «счет–письмо» при подъеме на 5000–6000 м

Количество решенных примеров					
Этап	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
Перед «подъемом»	7,0	6	8	4	10
«Высота» 5000 м	8,0	6	10	4	12
«Высота» 6000 м	7,0	6	9	3	11
После «подъема»	8,0	7	10	5	12
Сравнение этапов «подъема»					
Перед «подъемом»	«Высота» 5000 м			p = 0,007	Т-критерий Вилкоксона
Перед «подъемом»	«Высота» 5000 м			p = 0,46	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 5000 м	«Высота» 6000 м			p = 0,023	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 6000 м	После «подъема»			p = 0,031	Т-критерий Вилкоксона
Перед «подъемом»	После «подъема»			p = 0,009	Т-критерий Вилкоксона

Таблица 2

Медиана, максимальное и минимальное число ошибок в пробе «счет–письмо» при подъеме на 5000–6000 м

Количество допущенных ошибок					
Этап	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
Перед «подъемом»	0,0	0	0	0	3
«Высота» 5000 м	1,0	0	1	0	2
«Высота» 6000 м	1,0	1	2	0	3
После «подъема»	1,0	0	1	0	3
Сравнение этапов «подъема»					
Перед «подъемом»	«Высота» 5000 м			p = 0,04	Т-критерий Вилкоксона
Перед «подъемом»	«Высота» 6000 м			p = 0,0003	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 5000 м	«Высота» 6000 м			p = 0,004	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 6000 м	После «подъема»			p = 0,009	Т-критерий Вилкоксона
Перед «подъемом»	После «подъема»			p = 0,065	Т-критерий Вилкоксона

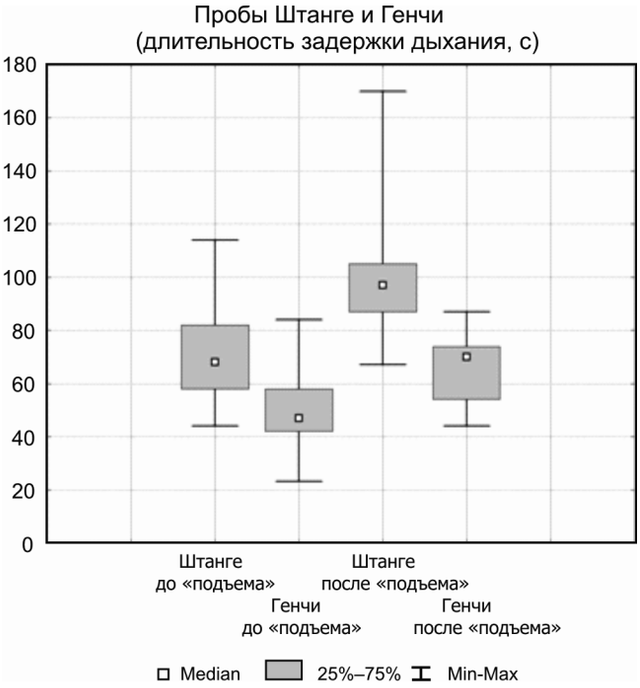


Рис. 1. Анализ результатов проб Штанге и Генчи по времени задержки дыхания, проведенных при «подъеме» на 5000–6000 м

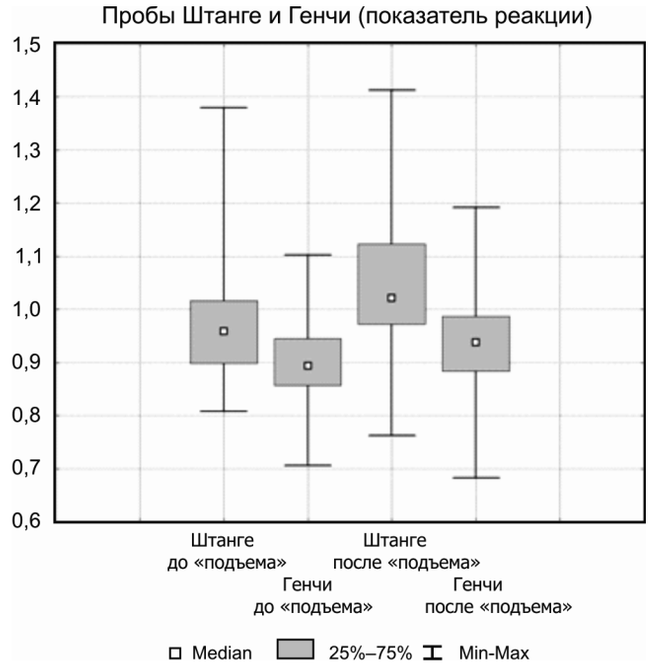


Рис. 2. Значения показателя реакции сердечно-сосудистой системы при выполнении пробы Штанге и Генчи до и после «подъема» на 5000–6000 м

исходного «наземного» уровня, далее, после «спуска», вновь достоверно повысилось относительно исходного уровня и «высоты» 6000 м.

Количество допущенных ошибок при выполнении устного счета достоверно повысилось при достижении условий умеренной гипоксии в условиях гипобарии («высота» 5000 м), еще более увеличилось при усилении степени выраженности гипоксии на «высоте» 6000 м, достоверно снизилось после «спуска» до исходного «наземного» уровня.

Снижение скорости и качества устного счета у обследованных в условиях гипоксии на фоне гипобарии («высота» 5000 и 6000 м) носило закономерный характер, связанный с негативным влиянием недостатка кислорода на умственную работоспособность. При этом обследованные показали способность к быстрой мобилизации на фоне стрессового воздействия гипоксии и высокий адаптационный потенциал за счет развитых функциональных резервов – на это указывают увеличение скорости счета в первые минуты воздействия гипоксии («высота» 5000 м), незначительный характер последующего ухудшения умственной работоспособности на фоне продолжающегося воздействия гипоксии («высота» 6000 м) и быстрое восстановление качества и даже улучшение скорости устного счета после прекращения воздействия гипоксии.

Результаты проб Штанге и Генчи (рис. 1) после воздействия гипоксии в условиях гипобарии на «высотах» 5000 и 6000 м достоверно и значительно улучшились (длительность задержки дыхания на вдохе по медиане увеличилась на 43 %, на выдохе – на 49 %).

Показатель реакции при пробе Штанге после воздействия гипоксии в условиях гипобарии на «высотах» 5000 и 6000 м незначительно ухудшился (на 6 %, с 0,96 до 1,02), оставшись при этом в пределах нормы (не более 1,2). Показатель реакции при пробе Генчи достоверно не изменился (рис. 2).

Улучшение результатов проб Штанге и Генчи после «подъема» на 5000 и 6000 м можно рассматривать как запуск механизмов срочной адаптации к гипоксии.

Сатурация кислородом достоверно и значительно снижалась с возрастанием степени гипоксии (с 99 до 70 % по медиане на «высоте» 6000 м) с последующим полным восстановлением оптимального уровня после «подъема» (табл. 3). При этом разброс значений сатурации в группе после «подъема» (97–99 %) был достоверно меньше, чем до «подъема» (96–99 %).

Снижение уровня насыщения крови кислородом (SpO_2) по данным пульсоксиметрии при «подъеме» на 5000 и 6000 м без кислородной поддержки является закономерным следствием дыхания разреженным воздухом с низким содержанием кислорода. Быстрое восстановление уровня SpO_2 сразу после прекращения воздействия гипоксии указывает на хорошее состояние кардиореспираторной системы обследованных. Однако следует отметить, что если

в клинической практике снижение SpO_2 до 90 % уже является показанием к реанимационным мероприятиям, то обследованные специалисты сохраняли высокую работоспособность и хорошее психофизиологическое состояние при уровне SpO_2 70 % (по медиане). Это наблюдение требует дальнейшего изучения.

Проведенные на 10 000 м пробы «счет–письмо» показали следующие результаты (рис. 3). Количество решенных примеров достоверно

Таблица 3

Показатели сатурации при «подъеме» в барокамере на 5000–6000 м

Насыщение крови кислородом на фоне гипоксии в условиях гипобарии					
Этап	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
Перед «подъемом»	99	98	99	96	99
«Высота» 5000 м	82	79	84	74	94
«Высота» 6000 м	70	69	74	63	89
После «подъема»	99	99	99	97	99
Сравнение этапов «подъема»					
Перед «подъемом»		«Высота» 5000 м		p = 0,0002	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 5000 м		«Высота» 6000 м		p = 0,0002	Т-критерий Вилкоксона
«Высота» 6000 м		После «подъема»		p = 0,0002	Т-критерий Вилкоксона
Перед «подъемом»		После «подъема»		p = 0,028	Т-критерий Вилкоксона

Таблица 4

Анализ результатов проб Штанге и Генчи по времени задержки дыхания, проведенных при «подъеме» на 10 000 м

Длительность задержки дыхания, с						
Этап		Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
Проба Штанге	Перед «подъемом»	68	60	89	43	165
	После «подъема»	83	64	108	47	192
Проба Генчи	Перед «подъемом»	49	39	74	26	135
	После «подъема»	78	65	86	32	155

Сравнение результатов проб			
Проба Штанге	Перед «подъемом»	p = 0,023	Т-критерий Вилкоксона
	После «подъема»		
Проба Генчи	Перед «подъемом»	p = 0,0005	Т-критерий Вилкоксона
	После «подъема»		

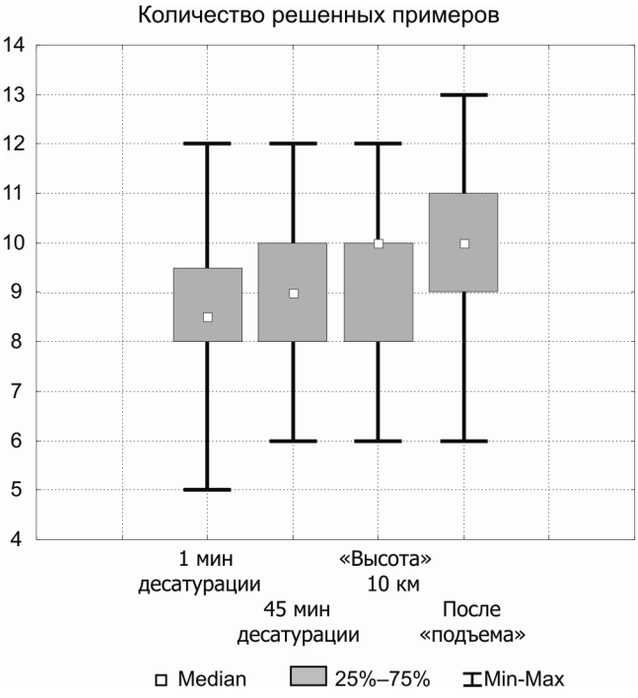


Рис. 3. Количество решенных примеров в пробе «счет–письмо» при «подъеме» на 10 000 м

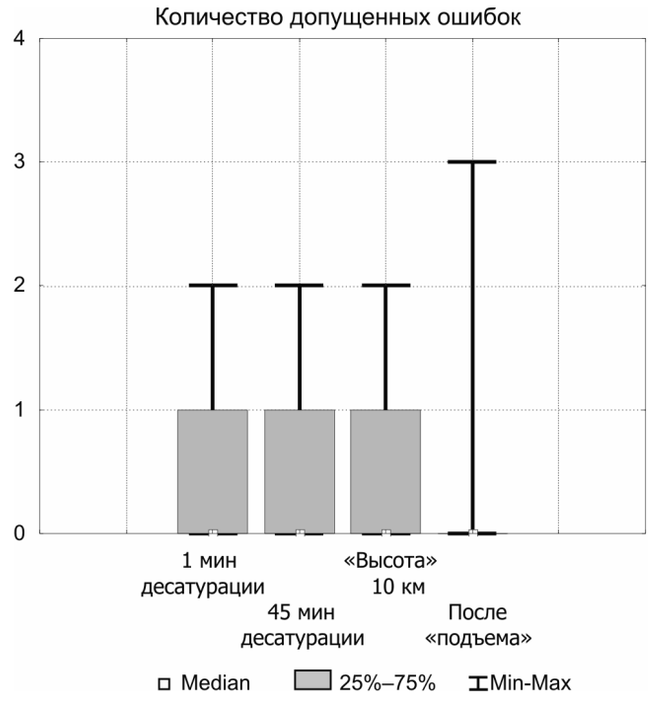


Рис. 4. Медиана, максимальное и минимальное число ошибок в пробе «счет–письмо» при «подъеме» на 10 000 м

повысилось через 45 мин дыхания кислородом, сохранилось на достигнутом уровне на «высоте» 10 000 м (с кислородной поддержкой) и еще более повысилось после спуска с «высоты» 10 000 м.

На всех этапах «подъема» до 10 000 м с кислородной поддержкой большинством обследованных при устном счете не допущено ни одной ошибки (рис. 4).

Высокие показатели умственной работоспособности (скорость и качество устного счета), оптимальное состояние кардиореспираторной системы (пробы Штанге и Генчи, показатель реакции сердечно-сосудистой системы на задержку дыхания, SpO_2) при «подъеме» на 10 000 м указывают на высокие защитные свойства специального снаряжения и хорошую устойчивость обследованных к декомпрессионному воздействию высокой степени разряжения окружающего воздуха, что достигнуто длительной предварительной десатурацией (дыхание чистым кислородом в течение 1 ч до «подъема» на 10 000 м).

При «подъеме» на 10 000 м рост скорости устного счета при сохранении его высокого качества обусловлен благоприятным воздействием кислорода, которым обследованные дышали в течение всего исследования.

Результаты проб Штанге и Генчи после длительного дыхания кислородом при проведении десатурации и «подъеме» на 10 000 м с кислородной поддержкой достоверно улучшились, в большей степени улучшились результаты пробы Генчи: длительность задержки дыхания на вдохе по медиане увеличилась на 22 %, на выдохе – на 59 % (табл. 4).

Показатель реакции как при пробе Штанге, так и при пробе Генчи достоверно не изменился (табл. 5).

Улучшение результатов проб Штанге и Генчи после «подъема» на 10 000 м связано с насыщением тканей организма кислородом, которым обследованные дышали продолжительное время, в течение всего «подъема». Следует отметить, что по результатам пробы Штанге тренирующее воздействие умеренных степеней гипоксии оказалось более эффективным, чем пассивное насыщение кислородом тканей за счет его длительной ингаляции.

От начала десатурации, во время и до окончания «подъема», за исключением времени пребывания на площадке 10 000 м, сатурация на фоне дыхания 100%-ным кислородом составляла 100 %. Показатели насыщения крови на высоте 10 000 м представлены в табл. 6.

Насыщение крови кислородом на «высоте» 10 000 м на фоне кислородной поддержки оставалось на нормальном уровне.

Выводы

1. Психофизиологическая подготовка должна включать теоретическую подготовку по высотной физиологии и правилам пользования

Таблица 5

Значения показателя реакции сердечно-сосудистой системы при выполнении пробы Штанге и Генчи до и после «подъема» на 10 000 м

Показатель реакции (ЧСС после «подъема»/ ЧСС перед «подъемом»)						
Этап		Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
Проба Штанге	Перед «подъемом»	0,96	0,87	1,05	0,62	1,28
	После «подъема»	0,99	0,93	1,05	0,62	1,39
Проба Генчи	Перед «подъемом»	0,92	0,84	0,98	0,66	1,20
	После «подъема»	0,98	0,90	1,03	0,76	1,10

Сравнение результатов проб			
Проба Штанге	Перед «подъемом» / После «подъема»	p = 0,57	Т-критерий Вилкоксона
Проба Генчи	Перед «подъемом» / После «подъема»	p = 0,37	Т-критерий Вилкоксона

Таблица 6

Показатели сатурации при «подъеме» в барокамере на 10 000 м на фоне кислородной поддержки

Насыщение крови кислородом					
Этап	Медиана	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Минимум	Максимум
«Высота» 10 000 м	98	96,5	98	95	99

кислородно-дыхательной аппаратурой (КДА), ознакомительные барокамерные «подъемы» по обучению методам самоконтроля и распознавания симптоматики гипоксии с определением степени устойчивости, а также ознакомительные барокамерные «подъемы» на высоту 10 000 м с отработкой правил пользования КДА «Окси-высота» при проведении десатурации от бортовых источников кислорода и от индивидуальных автономных источников кислорода при десантировании с одновременным выявлением лиц с предрасположенностью к ВДБ.

2. Обследованные показали высокий уровень адаптационных резервов к воздействию гипоксии умеренных степеней (соответствующей высотам 5000 и 6000 м) и достаточную устойчивость к декомпрессионному воздействию высоких степеней разрежения окружающего воздуха (соответствующей высоте 10 000 м).

3. Примененные с целью экспертной оценки функционального состояния и психофизиологической подготовки сводной группы высотного десантирования методики барокамерных «подъемов» показали свою высокую эффективность.

4. Сохранение сатурации кислородом на уровне 98 % (по медиане) при «подъеме» на 10 000 м с кислородной поддержкой указывает на правильное использование и эффективную работу используемого индивидуального защитного снаряжения.

5. Высокая тренированность обследуемой группы десантников-высотников исключила возможность перенапряжения регуляторных систем, срыва адаптационных механизмов и обеспечила полную психофизиологическую готовность к выполнению поставленной задачи.

Список литературы

1. *Книга В.В., Праскурничий Е.А.* Высотная болезнь: Учеб. пособие. М., 2014.

Kniga V.V., Praskurnichy E.A. Altitude sickness: Textbook. Moscow, 2014.

2. *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.

3. *Черняков И.Н., Малкин В.Б.* Высотные факторы полета и средства защиты летчика // Авиационная медицина: Руководство. М., 1986. С. 20–75.

Chernyakov I.N., Malkin V.B. High-altitude flight factors and means of protection of the pilot // Aviation medicine: Guide. Moscow, 1986. P. 20–75.

4. *Катунцев В.П.* Высотная декомпрессионная болезнь: экспериментальное исследование патогенеза и путей профилактики: Автореф. дис. … докт. мед. наук. М., 1996.

Katuntsev V.P. Altitude decompression sickness: an experimental study of pathogenesis and ways of prevention: Avtoreferat dissertatsii … doktora meditsinskikh nauk. Moscow, 1996.

5. *Соколов Ю.А., Пантюхов А.П.* Функциональное состояние летчика при изменении барометрического давления: Учеб.-метод. пособие. Минск, 2010.

Sokolov Yu.A., Pantyukhov A.P. The functional state of a pilot with a change in barometric pressure: An educational and methodological manual. Minsk, 2010.

6. *Голофеевский В.Ю. Смолянинов А.Б., Войтенко А.М., Розентул А.Ш.* Врачебно-летная экспертиза: методики терапевтического обследования. СПб., 2003.

Golofeevsky V.Yu., Smolyaninov A.B., Voitenko A.M., Rosentul A.Sh. Medical flight examination: methods of therapeutic examination. St.-Petesburg, 2003.

7. Методики исследований в целях врачебно-летной экспертизы. М., 1995.

Research methods for medical flight examination. Moscow, 1995.

8. Приказ Минобороны РФ от 27 апреля 2009 г. № 265 «Об утверждении Федеральных авиационных правил медицинского обеспечения полётов государственной авиации».

Order of the Ministry of Defense of the Russian Federation № 265 dated April 27, 2009 «On Approval of the Federal Aviation Regulations for Medical Support of State Aviation Flights».

9. Практикум по психологической подготовке летчиков. Монино, 2002.

A workshop on psychological training of pilots. Monino, 2002.

10. Руководство по медицинскому обеспечению полетов авиации ВС СССР. М., 1991.

Manual on medical support of aviation flights of the USSR Armed Forces. Moscow, 1991.

11. *Малкин В.Б., Гиппенрейтер Е.Б.* Острая и хроническая гипоксия // Проблемы космической биологии. М., 1977. Т. 35. 319 с.

Malkin V.B., Gippenreiter E.B. Acute and chronic hypoxia // Problems of space biology. Moscow, 1977. V. 35. 319 p.

12. *Черняков И.Н.* Средства жизнеобеспечения летчика // Авиационная медицина. М., 1985. С. 79–101.

Chernyakov I.N. Means of life support of the pilot // Aviation medicine. Moscow, 1985. P. 79–101.

13. Методика психофизиологической подготовки бортовых авиационных техников к экстремальным высотным факторам полета. М., 2020.

Methods of psychophysiological training of airborne aviation technicians to extreme altitude flight factors. Moscow, 2020.

14. *Гамза Н.А., Гринь Г.Р., Жукова Т.В.* Функциональные пробы в спортивной медицине. М., 2010.

Gamza N.A., Grin' G.R., Zhukova T.V. Functional tests in sports medicine. Moscow, 2010.

15. *Загрядский В.П., Сулимо-Самуйлло З.К.* Методы исследования в физиологии труда АН СССР. Л., 1976.

Zagryadsky V.P., Sulimo-Samuyllo Z.K. Methods of research in labor physiology. Leningrad, 1976.

Поступила 25.02.2022

HYPOBARIC CHAMBER «ASCENTS» AS A METHOD OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL TRAINING FOR RISKY OCCUPATIONS ASSOCIATED WITH EXPOSURE TO HIGH-LEVEL HYPOXIA

Filatov V.N., Shishov A.A., Dvornikov M.V., Shishkin A.N., Ryzhov D.I., Nikiforov D.A.

Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

The paper summarizes the experience in hyperbaric psychophysiological training of a group of 29 paratroopers for descending from 10 000 m in the Far North. Paratroopers with normal endurance of moderate and mean hypoxia were «ascended» to 5,000-6,000 and 10,000 meters. «Ascent» to 10,000 m with the use of oxygen and protective equipment was performed with good tolerance.

Key words: hyperbaric chamber «ascent», psychophysiological training, high-altitude landing, hypoxia.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 64–72.

УДК 355.469.34+533.6.013.622+621.039.586+613.693+629.7

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ АВАРИЙНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Бурмистров В.И.[1], Иванов И.В.[1, 2], Маткевич Е.И.[1], Праскурничий Е.А.[3]

[1]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
[2]Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Минобороны России, Санкт-Петербург
[3]Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва

E-mail: ivanov-iv@yandex.ru

Проведен анализ аварийности беспилотных летательных аппаратов (БЛА) MQ-1 Predator и MQ-9 Reaper по имеющейся в открытом доступе информации за период с 2001 по 2021 г., установлены основные причины аварий и вклад «человеческого фактора» в авиационные происшествия на основных этапах полета.

Проанализированы данные об авиационных происшествиях с БЛА по архивам их аварий (Drone Crash Database и др.) в 12 странах мира за период с 2001 по 2021 г. – 39 аварий на авиабазах США и 135 аварий при полетах в третьих странах.

Установлено, что ведущими причинами аварий БЛА при выполнении реальных задач являлись конструктивные и производственные дефекты (недостатки), которые могли быть обусловлены продолжительностью эксплуатации техники. Доля аварий из-за ошибок пилота-оператора БЛА варьирует от 19,4–22,9 % при целевом использовании подготовленными пилотами-операторами и до 60–64,7 % при использовании в режиме обучения навыкам управления. Разработка подходов к снижению аварийности БЛА должна включать в качестве важного направления повышение уровня обучения пилотов-операторов, применение в процессе обучения современных тренажеров с функцией виртуальной реальности полета, использование при этом учебных заданий с нестандартными стрессовыми ситуациями, в том числе с моделированием сочетанных причин аварий.

Ключевые слова: безопасность полетов, беспилотный летательный аппарат, аварийность, предупреждение авиационных происшествий, внешний пилот, пилот-оператор, человеческий фактор.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 73–84.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-73-84

В последнее десятилетие показана важная роль в современной авиации беспилотных летательных аппаратов (БЛА), которые решают значительный круг задач [1]. В военной области они применяются для ведения разведки и обнаружения объектов, выдачи в реальном масштабе времени информации о них на свои пункты управления. Разведывательно-ударные и ударные БЛА поражают объекты, военную технику и войска имеющимися средствами: бомбами и управляемыми ракетами. На сегодняшний день сотни БЛА используются в военных операциях в Ливии, Сирии, Ираке, Йемене, Сомали, Пакистане, Афганистане и других странах. Они патрулируют маршруты, следят за обстановкой и могут нанести огневой удар в случае необходимости.

Отечественными производителями созданы и находятся в разработке несколько образцов БЛА тяжелого класса – «Форпост», «Орион-Э», «Альтиус», «Сириус», «Гелиос-РЛД». Первые образцы отечественных БЛА создавались по прототипу израильского беспилотника Searcher Mk II («Форпост»), турецкого беспилотника Bayraktar TB2 («Орион»). В последующем началось производство полностью отечественных аппаратов данного типа и разрабатываются перспективные образцы («Гром», «Охотник»).

К средневысотным БЛА с поршневыми авиационными двигателями, с радиусом действия до 700 км и высотой полета до 5–7 км относят «Форпост», «Орлан-Э», «Сириус», к высотным БЛА с турбовинтовым или турбореактивным двигателями, с радиусом действия более 700 км и высотой полета до 12 км относят «Альтиус», «Гром», «Охотник». Эти комплексы способны выполнять весь спектр разведывательных задач с применением оптических, радиотехнических и радиолокационных средств. При применении спутникового канала управления радиус применения беспилотника значительно увеличивается.

Беспилотные комплексы могут иметь не только военное, но и гражданское назначение [2]. В народном хозяйстве высокие летно-технические характеристики и большой радиус применения БЛА,

обеспечиваемый спутниковой системой связи, позволяют выполнять задачи радиолокационного дозора и наблюдения, их предназначение – воздушное патрулирование назначенных районов, ледовая разведка для обеспечения судоходства по трассе Северного морского пути, обеспечение радиосвязи в случае чрезвычайных ситуаций, определение координат наземных и надводных объектов, противопожарное патрулирование лесов, патрулирование морской экономической зоны, доставка грузов в труднодоступные районы, наблюдение за дорожной обстановкой и др.

К настоящему времени из произведенных за рубежом нескольких тысяч БЛА около 600 потерпели аварии и разбились [3–7]. Анализ причин этих аварий необходим, чтобы предупреждать их в отечественной практике использования БЛА [8]. Однако ввиду короткого периода и не столь значительного количества произведенных отечественных БЛА имеющейся информации для статистического изучения их аварийности недостаточно. В связи с этим представляется актуальным проанализировать причины аварийности БЛА зарубежных производителей, близких по конструктивным параметрам к отечественным разработкам.

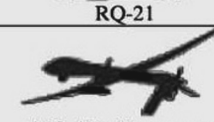
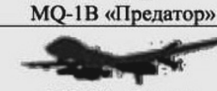
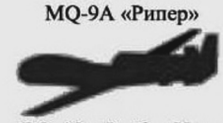
Класс	Группа	Масса, кг	Высота полета, м	Скорость, км/ч	Образец БЛА
Малоразмерные беспилотные авиационные системы (тактические БЛА)	1	0-9	до 370	до 185	RQ-11B «Равен» RQ-12A «Уасп»
	2	9,5-25	до 1070	до 465	«Скэн Игл»
	3	до 600	до 5500	до 465	RQ-21
Дистанционно пилотируемые летательные аппараты (оперативные и стратегические БЛА)	4	более 600	до 5500	более 465	 MQ-1B «Предатор»
	5	более 600	более 5500	более 465	 MQ-9A «Рипер»  RQ-4B «Глобал Хок»

Рис. 1 Классификация БЛА, принятая в США

Цель исследования: провести анализ аварийности БЛА MQ-1 Predator («Хищник») и MQ-9 Reaper («Жнец») по имеющейся в открытом доступе информации за период с 2001 по 2021 гг.; установить основные причины аварий и вклад «человеческого фактора» в авиационные происшествия на основных этапах полета.

Методика

На 1-м этапе были обобщены и сопоставлены тактико-технические характеристики БЛА отечественного и иностранного производства. Их сравнение по тактико-техническим характеристикам проведено для отечественных БЛА «Орион», «Сириус», «Гелиос-РЛД» (АО «Кронштадт») и «Альтиус РУ» (АО «Уральский завод гражданской авиации»).

В соответствии с классификацией, принятой в США [9, 10] (рис. 1), по своим тактико-техническим характеристикам БЛА подразделяются на малоразмерные беспилотные летательные аппараты (тактические БЛА – группы 1, 2, 3) и дистанционно пилотируемые летательные аппараты (оперативные и стратегические БЛА – группы 4 и 5). По данной классификации MQ-1 Predator («Хищник») относится к 4-й группе, MQ-9 Reaper («Жнец») – к 5-й группе.

По классификации БЛА, принятой в НАТО [3], БЛА подразделяются на 3 класса в зависимости от веса: класс I включает микро-, мини- и небольшие дроны весом до 150 кг, класс II – дроны весом более 150 кг, но менее 600 кг («тактические»), класса III, включая американские Predator и Reaper, - дроны весом более 600 кг.

На 2-м этапе были выбраны случаи авиационных происшествий классов А и В с БЛА MQ-1 Predator («Хищник) и MQ-9 Reaper («Жнец»). При этом исходили из системы классификации несчастных случаев, принятых в армии США на основе денежного ущерба и / или тяжести травм персонала. Как видно из табл. 1, классы А и В – это самые серьезные степени тяжести аварий.

Всего были проанализированы 1143 сообщения за период с 2001 по 2021 гг. из следующих источников:

1) архив аварий БЛА класса А за период с 2001 по 2016 г. (небоевые потери) – 237 аварий [4];

2) архив аварий с 2007 г. по настоящее время военных беспилотников (дронов) (Drone Crash Database) (классы B and C) – 458 аварий на июль 2021 г. [5];

3) архив самых серьезных аварий беспилотных летательных аппаратов с 2001 по 2014 г. – 194 аварий [6];

Таблица 1

Классы несчастных случаев в армии США*

Класс A	Класс B	Класс C	Класс D
Несчастный случай, в результате которого общая стоимость имущественного ущерба составляет 1 000 000 долларов США или более; армейский самолет или ракета уничтожены, пропали без вести или брошены; или травма и / или профессиональное заболевание приводят к летальному исходу или необратимой полной инвалидности	Несчастный случай, в результате которого общая стоимость имущественного ущерба составляет от 200 000 до 1 000 000 долларов США; травма и / или профессиональное заболевание приводят к необратимой частичной нетрудоспособности или когда трое или более сотрудников госпитализированы в качестве стационарных пациентов	Несчастный случай, в результате которого общая стоимость имущественного ущерба составляет от 20 000 до 200 000 долларов США; травма, которая приводит к потере рабочего времени вне дня или смены, в которую она произошла, или профессиональное заболевание, которое приводит к потере рабочего времени или инвалидности	Несчастный случай, в результате которого общая стоимость имущественного ущерба составляет от 2000 до 20 000 долларов США

Примечание. * – Department of the Army. Accident reporting and records. Washington, DC. Army Regulation. 1994. 385-40; Williams K.W. A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications. Report № DOT/FAA/AM-04/24. Final Report.Office of Aerospace Medicine Washington, DC 20591. Federal Aviation Administration (FAA) Civil Aerospace Medical Institute. Oklahoma City, OK 73125. December 2004.

4) архив аварий с 2009 по 2018 г. Drone Crash Dataset 2009–2018 – 254 аварии [7].

Из этих информационных баз были выбраны аварии с MQ-1 Predator («Хищник») и MQ-9 Reaper («Жнец»). Все аварии были разделены на 2 выборки: 1) авиабазы США; 2) третьи страны, где США использовали БЛА (Афганистан, Ирак, Йемен, Сирия, Кувейт, Сомали, Джибути, Мали, Нигер, Сейшельские острова, Аденский залив).

На 3-м этапе исследования были систематизированы и проанализированы причины аварий БЛА, которые указывались в заключениях комиссий экспертов, создаваемых для их расследования. В данном исследовании все причины аварий были классифицированы на 5 основных групп:

1) планер и его системы – отказы и неисправности конструкции планера, его механических систем и электрооборудования;

2) двигатель – отказы двигателя;

3) АСУ – неисправности в автоматических системах управления полетом (нарушения в электронном оборудовании, программном обеспечении полета, системе связи, сбои в работе наземного пункта управления);

4) сложные метеоусловия;

5) человеческий фактор – ошибки пилота-оператора, пилота-инструктора, оператора наземного пункта управления (GCS – Ground control station) и техника БЛА.

Примеры технических описаний причин аварий по заключениям проведенных экспертами расследований приведены в табл. 2.

При статистической обработке результатов оценивали количество аварий по этапам полета (при взлете, в полете, при посадке) в долях (%) от общего количества аварий для данного типа БЛА, а также количество причин аварий общее и по этапам полета в долях (%) от общего количества причин аварий для данного типа БЛА. По заключениям экспертов при части аварий наблюдалось сочетание 2 или нескольких причин, в связи с этим при статистическом анализе количество причин аварий может быть больше количества аварий.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного обобщения характеристик образцов БЛА отечественного и иностранного производителей приведены в табл. 3. Как видно по тактико-техническим характеристикам, в качестве аналогов отечественных средневысотных БЛА большой продолжительности полета среднего класса «Орион-Э» и «Сириус» (АО «Кронштадт») можно рассматривать БЛА производства General Atomics MQ-1 Predator («Хищник»). MQ-1 производился с 1996 по 2011 г. и состоял на вооружении до 2018 г.; всего было передано ВВС США около 270 MQ-1; общие небоевые потери оцениваются в 145 БЛА [11, 12].

В качестве аналога отечественных средневысотных БЛА большой продолжительности полета тяжелого класса «Гелиос-РЛД» (АО «Кронштадт») и «Альтиус РУ» (АО «Уральский завод гражданской авиации») можно рассматривать БЛА производства General Atomics MQ-9 Reaper («Жнец»). MQ-9 состоит на вооружении войск США с 2006 г. по настоящее время. Они являются ударными дистанционно пилотируемыми БЛА (remotely piloted aircraft – RPA) оперативного и стратегического класса, группы 3 и 4 с назначением – разведка, наблюдение, нанесение ракетных и бомбовых ударов.

Таблица 2

Описания причин аварий БЛА по результатам служебных расследований

№	Группы причин аварий	Примеры причин аварий
1	*Планер и его системы.* Отказы и неисправности планера – его механических и электрической систем из-за конструктивно-производственных дефектов, нарушений летной эксплуатации систем и технологии предполетной подготовки	Авиабаза Кабула, Афганистан, 20.04.2009 г. У MQ-1 через 9 ч полета произошел полный отказ электрооборудования, в результате были потеряны сигналы транспондера и связь с наземной станцией GCS, не сработала также программа аварийного возвращения БЛА на базу вылета, и он разбился. Побережье Джибути, 4.02.2015 г. У MQ-9 дважды вышел из строя электрогенератор, БЛА остался без достаточного количества электроэнергии, необходимой для возвращения на базу, и был намеренно сброшен в море
2	*Двигатель.* Отказы и неисправности двигателя и его систем из-за конструктивно-производственных дефектов, нарушений летной эксплуатации двигателя и технологии его предполетной подготовки	Национальный учебный центр Калифорния, США, 20.03.2009 г. MQ-9 разбился при аварийной посадке в пустыне после отказа двигателя в результате потери давления масла. Причиной аварии был отказ клапана регулирования температуры масляной системы, который был неправильно собран во время производства. Авиабаза Багдад, Ирак, 17.08.2004 г. MQ-1 сгорел и развалился в воздухе после того, как его двигатель загорелся. Следователи установили, что пожар начался в моторном отсеке из-за неправильно проложенной линии подачи масла
3	*Автоматизированная система управления (АСУ)*	Отказы и неисправности АСУ в полете из-за конструктивно-производственных дефектов, нарушений правил летной эксплуатации и технологии предполетной подготовки АСУ в целом
3.1	*Электронное оборудование.* Отказы и неисправности электронных модулей, датчиков, процессорных плат, компьютеров системы управления и навигации летательным аппаратом	Аэродром Чабелли, Джибути, 29.12.2015 г. У MQ-9 при заходе на посадку в результате отказа электронного модуля управления шасси не вышла передняя стойка шасси. При аварийной посадке на «брюхо» БЛА получил значительные повреждения фюзеляжа и оборудования. Турция, северо-восточный район, 21.08.2017 г. При полете MQ-1 по запрограммированному маршруту произошел отказ модуля управления правого крыла. Была потеряна связь, не сработала программа автоматического возвращения на аэродром базирования. БЛА упал и разбился
3.2	Программное обеспечение полета	Во время выполнения боевой задачи на юге Афганистана 13.09.2009 г. MQ-9 потерял связь с GCS, при этом программное обеспечение возврата на базу вылета не сработало. Затем MQ-9 пролетел сотни миль на север, недалеко от границы с Таджикистаном был перехвачен и сбит истребителем F-15 ВВС США. В рамках миссии наблюдения над Ираком 18.09.2012 г. MQ-1 летел по запрограммированному маршруту. После потери связи с наземной станцией GCS оказалась невозможной навигация полетом, не сработала программа автоматического возвращения на аэродром базирования, самолет продолжил неуправляемый полет и был потерян
3.3	Система связи по управлению летательным аппаратом	Авиабаза Багдад, Ирак, 14.09.2009 г. MQ-1 через 9 ч полета разбился после того, как экипаж потерял связь с наземной станцией GCS и со спутниковым каналом передачи навигационных данных. Следователи объяснили потерю связи быстрым изменением высоты и скорости полета, что в совокупности с неисправным датчиком привело к сваливанию в штопор и аварии самолета. Джибути, 5.04.2013 г. При полете MQ-9 на большой высоте внезапно изменились метеоусловия, произошло обледенение самолета, и спутниковая связь с БЛА периодически пропадала, разбился в безлюдном районе
3.4	*Наземный пункт управления летательным аппаратом (GCS).* Отказы и неисправности оборудования для управления БЛА с наземных пунктов управления (GCS)	Авиабаза Кэннон, Нью-Мексико, США, 21.07.2008 г. Наземный пункт управлял тремя MQ-1 в Афганистане. В процессе работы на GCS пропало напряжение в сети энергопитания, в результате были потеряны связь и управление тремя БЛА. После восстановления электропитания связь с одним из БЛА не восстановилась, запрограммированное возвращение на базу вылета не состоялось, разбился в неизвестном месте. Невада, округ Дуглас, США, 5.12.2012 г. На GCS при пилотировании MQ-9 сразу после MQ-1 не была выполнена технология перехода режима управления с MQ-1 на MQ-9. В результате из-за неправильно выбранной настройки наземной станции GCS во время управления двигателем по ошибке была запущена обратная тяга воздушного винта. Произошла потеря управления БЛА с последующим его падением

продолжение таблицы 2

№	Группы причин аварий	Примеры причин аварий
4	*Сложные метеоусловия (СМУ)*	Авиабаза Джелалабад, Афганистан, 5.06.2011 г. После удара молнии MQ-1 потерял спутниковую связь и разбился. Экипаж знал, что он летит вблизи грозы, но был срочный полет по оказанию поддержки наземных войск. Джибути, 5.04.2013 г. По данным командования США, в Африке при полете MQ-9 на большой высоте изменились метеоусловия – появилась сильная турбулентность, произошло обледенение самолета, спутниковая связь с БЛА стала неустойчивой. Ввиду выраженной болтанки у экипажа возникли проблемы управления самолетом, и в качестве меры предосторожности экипаж направил БЛА в международные воды в Аденском заливе, где он разбился и затонул
5	*Человеческий фактор*	
5.1.	Ошибки пилота-оператора – ошибки и нарушения при пилотировании БЛА, несоблюдение требований руководства по летной эксплуатации, выдерживания допустимых скорости полета, углов крена и тангажа	Афганистан, 11.12.2003 г. Авария случилась, когда неопытный пилот MQ-1 неправильно истолковал предупреждение об обледенении, отключил автопилот, а затем дал агрессивную команду на набор высоты, что привело к потере связи. У пилота также отмечен малый опыт полетов без помощи системы автопилота. Авиабаза Багдад, Ирак, 16.08.2010 г. Пилот MQ-1 забыл включить систему повышения устойчивости, из-за чего БЛА вышел из-под контроля. Согласно расследованию, пилоты-операторы не проконтролировали, что табло включения «SAS включено» не появилось на видеодисплее, хотя этого требуют надлежащие процедуры контроля. В результате БЛА разбился сразу после взлета. Авиабаза Джелалабад, Афганистан, 24.07.2012 г. MQ-1 разбился при попытке взлета. Пилоты-операторы разговаривали и шутили друг с другом, тем самым отвлеклись от управления и контроля за взлетом самолётом. В это время камера на борту беспилотника неожиданно сдвинулась и стала транслировать изображение, не соответствующее обстановке по курсу движения самолета. Но пилот не обратил внимания на смещение камеры, нажал на педаль акселератора и самолет вместо движения по ВПП врезался в караульное помещение. Кувейт, 24.08.2020 г. Пилот MQ-9 перед заходом на посадку не запросил уточненную сводку погоды. При приземлении БЛА попал под воздействие сильного сдвига ветра, выкатился за пределы ВПП и разрушился
5.2	Ошибки оператора наземного пункта управления (GCS) (ошибки и нарушения технологических указаний и требований инструкций, допускаемые операторами при управлении БЛА с наземных пунктов управления)	Авиабаза Крич, Невада, США. 11.12.2014 г. MQ-9 разбился в двух милях от ВПП после того, как пилот-стажер и пилот-инструктор скомандовали БЛА с наземной станции слишком быстрое снижение высоты полета. Нью-Мексико, США, 2.09.2020 г. Пилот MQ-9 произвел взлет с отрывом от ВПП на скорости меньше допустимой при взлете, в результате БЛА упал за пределами ВПП и разрушился
5.3	Ошибки техников БЛА	Авиабаза Якобабад, Пакистан, 1.01.2003 г. MQ-1 разбился из-за отказа двигателя по причине утечки масла. При предполетном обслуживании самолета был заявлен дефект «утечка масла», но техник выявить причину этого не смог и скрыл эту неисправность, в результате этого в полёте из-за утечки масла произошел отказ двигателя. Авиабаза Крич, Невада, США, 22.06.2006 г. MQ-1 разбился через 5 мин после взлета. Авария произошла из-за плохого обслуживания двигателя: техник самолета нарушил технологию крепления масляного фильтра при его замене, в результате чего в полете произошла утечка масла и отказ двигателя. Ирак, 19.10.2009 г. MQ-1 разбился при посадке из-за отказа двигателя. Причиной аварии было использования неисправного инструмента и нарушение технологии при затяжке подшипника вала воздушного винта при его замене техником БЛА – при монтаже техник допустил избыточное затягивание подшипника, что в полете привело к разрушению подшипника, затем вала воздушного винта и к отказу двигателя самолета

По разным источникам, с 2007 по 2018 г. фирмой General Atomics планировалось передать на вооружение ВВС США около 350 БЛА MQ-9. За период с 2007 г. по настоящее время по различным источникам было потеряно (разрушено) около 60 БЛА MQ-9 [11, 13]. Для авиабаз США для данных типов БЛА проанализированы доступные в открытой печати сведения об аварийности (небоевые потери) при учебных полетах с 2001 г по настоящее время – всего 39 аварий, из них MQ-1 за

Таблица 3

Тактико-технические характеристики БЛА отечественных производителей и США*

Тактико-технические характеристики	Отечественные производители		США	Отечественные производители		США
	«Орион-Э»	«Сириус» («Иноходец-РУ»)	MQ-1 Predator	«Гелиос-РЛД»	«Альтиус-РУ»	MQ-9 Reaper
Производитель	АО «Кронштадт»	АО «Кронштадт»	General Atomics	АО «Кронштадт»	АО «Уральский завод гражд. Авиации»	General Atomics
Размах крыла, м	16,3	23	16,7	30	28,5	20,1
Длина, м	8	9	8,23	12,6	11,6	11
Высота, м	3,2	3,3	2,21	3,6		3,8
Масса пустого, кг	900	2000	512	3200	5000	2223
Максимальная взлетная масса, кг	1150	2500	1157	4000	7000	4760
Максимальная полезная нагрузка, кг	200	450	147–500	800–1000	1000/2000	1746
Тип двигателя	поршневой АПД-100, компания «Агат» 1 шт.	поршневые АПД-120, компания «Агат» 2 шт.	поршневой Rotax 914F (UL) 4-цилиндровый 1 шт.	газотурбинный ВК-800С, компания «Климов» 1 шт.	газотурбинные ВК-800С, компания «Климов» 2 шт.	турбовинтовой Honeywell TPE331-10 с цифровым электронным управлением 1 шт.
Мощность (в полете / взлетная), л.с.	100	120	115	450 /800	450 /800	776/900
Крейсерская скорость, км/ч	120–200	180	110–200	350–450	150–250	280–310
Дальность полета, км	300	1000	740	3000	до 10 000	1900/5920
Продолжительность полета: – средняя, ч – максимальная, ч	 24 30	 20 40	 20 40	 24 30	 24 48	 23 30
Максимальная высота полета, км	7,5	7,0	7,6	9,0 - 11,0	12,0	15,2
Период использования, год	с 2019	с 2023	1995–2018	с 2022	с 2020	с 2006

Примечание. * – источники информации к табл. 4:
БЛА отечественного производства:
https://kronshtadt.ru/products/bespilotnyij-kompleks-orion; https://en.wikipedia.org/wiki/Kronshtadt_Orion; https://kronshtadt.ru/products/bespilotnyij-letatelnyij-apparat-gelios-rld;
https://zen.yandex.ru/media/sferalive/gruppa-kronshtadt-razrabatyvaet-bpla-sirius-i-gelios-poka-mir-tomitelno-vzdyhaet-o-tureckih-bairaktarah-617ed600ae8db84300fdce23;
https://ria.ru/20211116/kronshtadt-1759235310.html; https://bmpd.livejournal.com/4123433.html; https://en.wikipedia.org/wiki/Sokol_Altius;
https://topwar.ru/174560-perspektivnye-bpla-sirius-i-gelios.html; https://missiles2go.ru/2015/12/04/rotax-ru/; https://topwar.ru/155263-utochneny-sroki-vyhoda-na-sertifikaciju-aviadvigatelja-vk-800s.html.
БЛА производства США:
https://bp-la.ru/bespilotnyj-letatelnyj-apparat-bpla-mq-1-predator/; https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator; https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/predator-xp;
https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a; https://bp-la.ru/bla-mq-9-reaper-bespilotnyj-letatelnyj-apparat/; https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper.

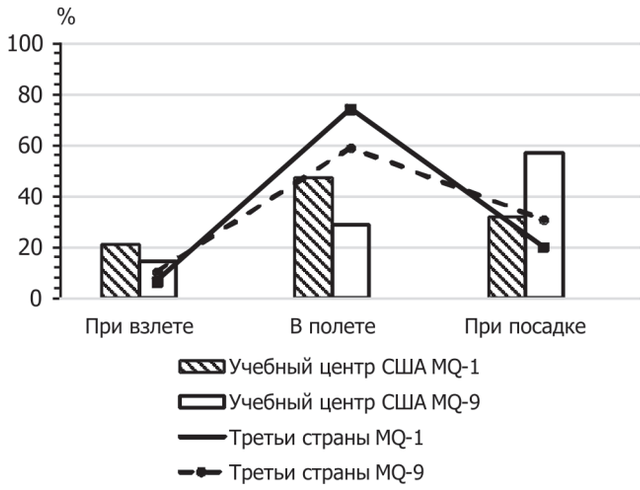


Рис. 2. Распределение общего количества аварий (%) по этапам полета MQ-1 и MQ-9 при полетах в учебном центре США и в третьих странах.
Здесь и на рис. 3: столбики – учебные центры США; кривые линии – третьи страны

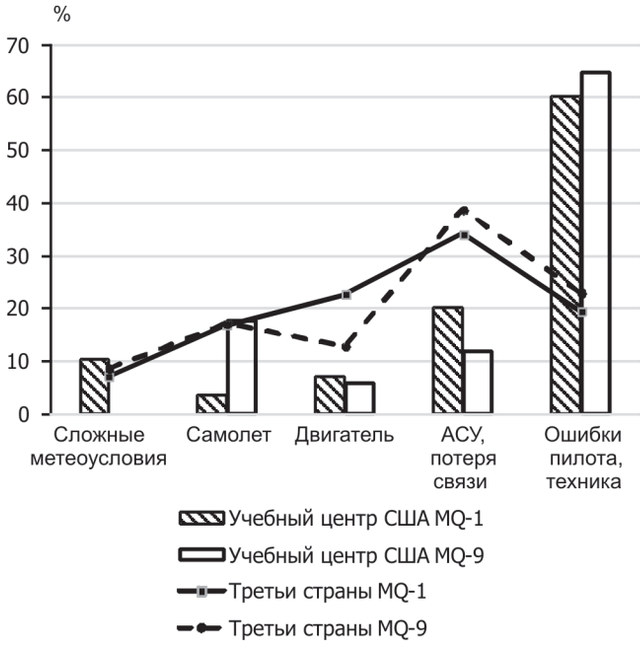


Рис. 3. Распределение (%) причин аварий MQ-1 и MQ-9 от общего количества причин аварий за полет в учебном центре США и в третьих странах

2001–2018 гг. – 19 аварий (класса А – 14 шт., класса В – 1 шт., нет данных о классе аварии – 4 шт.); MQ-9 за 2005–2021 гг. – 20 аварий (все класса А).

Для третьих стран для данных типов БЛА проанализированы доступные в открытой печати сведения об аварийности (небоевые потери) за период с 2001 г. по настоящее время – всего 135 аварий, из них MQ-1 за 2001–2018 гг. – 96 аварий (класса А – 73 шт., класса В – 4 шт., нет данных о классе аварии – 19 шт.); MQ-9 за 2005–2021 гг. – 39 аварий (все класса А).

Распределение общего количества аварий по этапам полета (рис. 2) показывает, что большая часть аварий для обоих типов БЛА происходила в полете и при посадке.

Для более совершенного летательного аппарата MQ-9 доля аварий по сравнению с MQ-1 уменьшилась при взлете на 6,7 %, в полете на 15–18,8 %, но при посадке возросла на 11–25,5 %. При использовании БЛА обоих типов в третьих странах потери на этапе полета составили 74 % для MQ-1 и 59 % для MQ-9, что было на 26,6–30,4 % выше по сравнению с потерями в учебных центрах США. Возрастание в третьих странах потерь БЛА на этапе полета связано со значительно большей продолжительностью полетов и нагрузкой на материально-техническую часть самолетов, чем при их полетах в учебных центрах США. При взлете и посадке во время выполнения задач в третьих странах потери составили для MQ-1 26 %, для MQ-9 41 %, что на 26,6–30,4 % ниже, чем в учебных центрах США. Это может объясняться более высокой квалификацией и уровнем ответственности пилотов-операторов, управляющих БЛА на взлете и при посадке в третьих странах по сравнению со стажерами учебных баз США.

Анализ общего количества причин аварий за полет (рис. 3) показывает, что для учебного центра США технические причины аварий в целом для MQ-1 и MQ-9 составляли 35,3–40 %, при использовании MQ-9 в 2 раза уменьшилась по сравнению с MQ-1 доля причин аварий по сбоям в АСУ и потерям связи, из-за ошибок в управлении при сложных метеоусловиях, но сохранялось преобладание в причинах аварий (60–64,7 %) ошибок пилота-оператора и техников по обслуживанию БЛА.

При использовании БЛА в третьих странах обращает на себя внимание меньший по сравнению с базами США вклад причин ошибок пилота-оператора и техника (19,4–22,9 %) и более высокая доля технологические причин аварий (77,1–80,6 %). Это свидетельствует о том, что ведущими причинами аварий БЛА MQ-1 и MQ-9 в этих странах являлись конструктивные и производственные дефекты (недостатки), которые могли быть обусловлены продолжительностью эксплуатации техники при значительно большем времени полета каждого самолета.

Несомненный интерес представлял анализ структуры причин аварий по основным этапам полета (рис. 4). В учебных центрах США структура причин аварий для MQ-1 и MQ-9 была очень схожей (см. рис. 4, А) – ошибки пилота-оператора (техника) составляли при взлете 10–8,7 %, в полете 16,6–17,4 %, увеличиваясь при посадке до 33–26,1 % от общего числа причин аварий. Как видно на рис. 4, А, при полетах более совершенного по

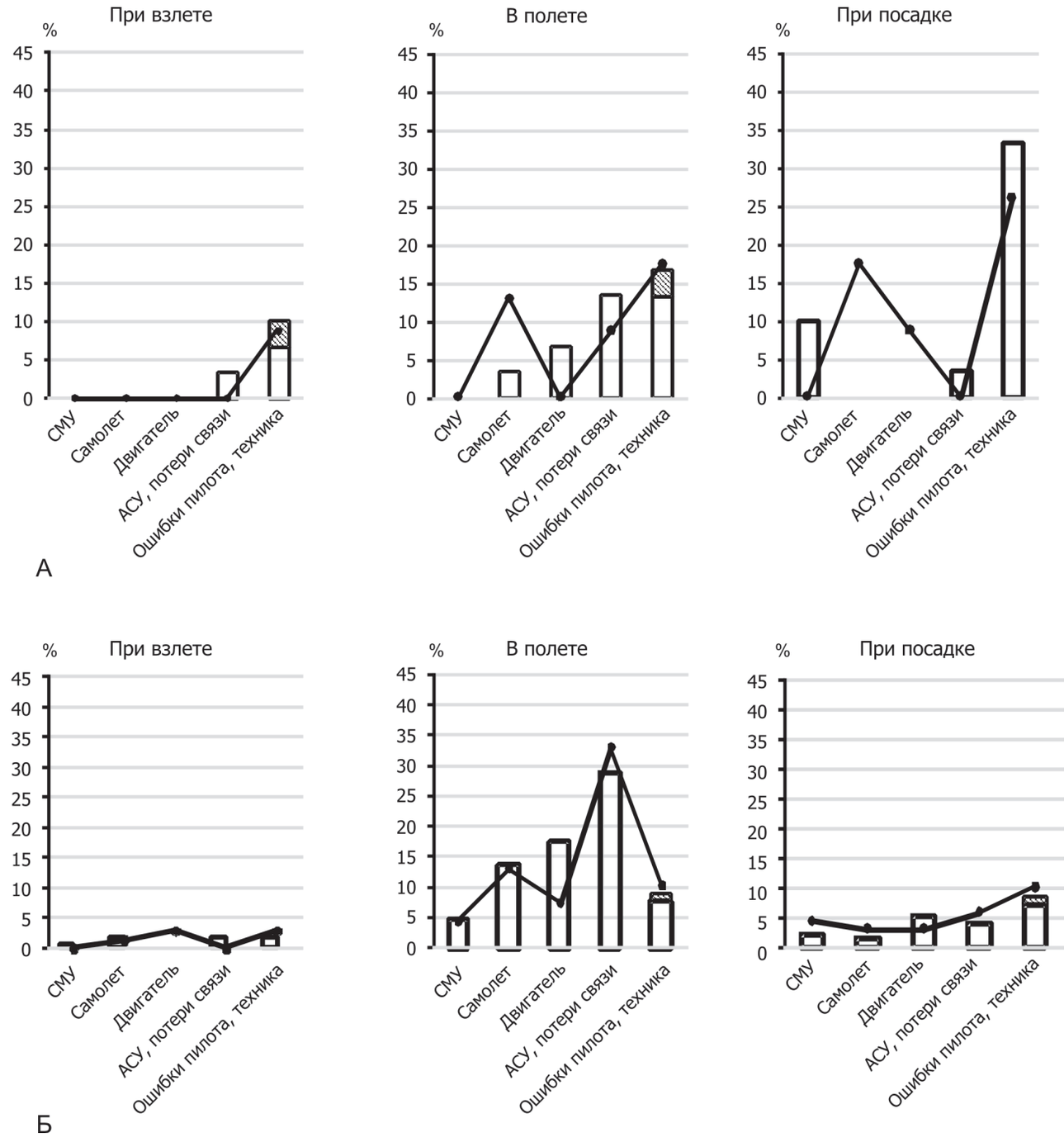


Рис. 4. Доля причин аварий (%) от общего количества причин на каждом этапе полета MQ-1 и MQ-9 в учебных центрах США (А) и в третьих странах (Б).
Столбики – MQ-1; кривые линии – MQ-9

сравнению с MQ-1 БЛА MQ-9 несколько ниже стала частота причин аварий в полете из-за отказов двигателя, сбоев АСУ и потерь связи, уменьшилась также доля аварий из-за ошибок пилота-оператора (техника) при посадке БЛА.

При эксплуатации в США потери БЛА на этапе полета составили для MQ-1 – 23,4 %, для MQ-9 – 17,7 %, тогда как в третьих странах – для MQ-1 59,5 %, MQ-9 – 52,8 %, т.е. в третьих странах (см. рис. 4, Б) потери самолетов в полете были в 2–2,5 раза выше по сравнению с учебными центрами США, что было связано, в основном, с отказами оборудования и сложными метеоусловиями.

В третьих странах по сравнению с базами США потерь БЛА из-за ошибок пилотов (техников) на этапе полета для MQ-1 было в 1,9 раза меньше,

для MQ-9 одинаково, при посадке аварий как MQ-1, так и MQ-9 было в 4 раза меньше, чем в учебных базах США. Это могло быть связано с лучшей подготовленностью и большей ответственностью пилотов БЛА при выполнении реальных задач в третьих странах, чем в процессе учебных полетов.

В ближайшем будущем эффективность решения значительной части задач беспилотной авиацией как в военной, так и в гражданской областях может быть выше, чем пилотируемыми летательными аппаратами. Это может быть обусловлено более быстрой реакцией на изменение обстановки автоматической системой управления в сравнении с реакцией летчика, а также отсутствием ограничений на перегрузки при их маневре.

На развитие беспилотных видов транспорта и на подготовку инфраструктуры для них в Российской Федерации до 2030 г. предполагается направить 839 млрд руб.: 490 млрд руб. из казны и 348 млрд руб. внебюджетных средств (Проект паспорта Федерального проекта «Инфраструктура беспилотных и подключенных транспортных средств», разработанного Минтрансом [2]). В целом документ предполагает развитие автоматизированного авто-, железнодорожного, воздушного и водного транспорта и создание инфраструктуры, а также нормативно-правовой базы, а именно условий и национальных стандартов, которые обеспечат легальность, безопасность и эффективность перевозок пассажиров и грузов беспилотным транспортом.

В связи с этим оценка вклада различных факторов, в том числе «человеческого фактора» в причины аварийности БЛА, остается важной задачей, что требует постоянного их изучения в связи с меняющимися технологиями производства и применением БЛА, условиями обеспечения полета и профессиональными компетенциями пилотов-операторов, техников и обеспечивающего персонала.

Как установлено классическими исследованиями [14, 15], причинами аварий самолетов «по человеческому фактору», пилотируемых летчиками, являлись пилотажные перегрузки с потерей сознания, нарушения пространственной ориентировки, иллюзии, запаздывание человеческого восприятия на высоких скоростях полета и др. При полетах БЛА эти закономерности в отношении пилота-оператора малоприемлемы и требуют дополнительного изучения. Данные [16] свидетельствуют, что в течение первых 10 лет использования MQ-1 Predator разбивался с крайне высокой частотой – на каждые 100 000 ч налета он попадал в 13,7 происшествий класса А. С 2009 г., после усовершенствования двигателя и систем управления, а также приобретения пилотами-операторами большого опыта в управлении дронами, количество аварий с потерями MQ-1 Predator упало до 4,79 происшествия класса А на каждые 100 000 ч налета.

Общее число аварий MQ-9 Reaper по сравнению с MQ-1 Predator в период с 2009 до 2014 г. снизилось до 3,17 случая на 100 000 ч налета. Это было достигнуто вследствие еще большей модернизации технических параметров БЛА (использование турбовинтового двигателя повышенной мощности, модернизация программного обеспечения полета и энергосистемы с уменьшением ее отказов), а также повышением требований к квалификации пилотов-операторов. Представители ВВС указали, что частота аварий для MQ-9 Reaper приблизилась к стандарту, установленному истребителями F-16 и F-15, которые за последние 5 лет показали уровень аварий класса А 1,96 и 1,47 соответственно, согласно статистическим данным Центра безопасности ВВС на базе ВВС Киртланд в Нью-Мексико [16].

Как видно из результатов проведенного исследования аварийности БЛА, техническое совершенство двигателя, автоматической системы управления, программного обеспечения, с одной стороны, снижают количество отказов техники в полете, с другой стороны – предъявляют повышенные требования к пилоту-оператору, особенно при посадке. При усложнении техники возрастают нервно-психические нагрузки, что способствует повышенному эмоциональному напряжению пилота-оператора в процессе их разрешения и ликвидации нестандартных ситуаций в полете.

На этапе обучения навыкам по управлению БЛА квалификация пилотов была значительно ниже, чем при реальной эксплуатации БЛА в третьих странах, поэтому при учебных полетах была отмечена большая частота аварий по человеческому фактору. В то же время в третьих странах при выполнении задач удлиняется время полетов и соответственно нагрузка на оборудование, усложняется метеообстановка, что проявляется в увеличении доли аварий в полете по техническим причинам.

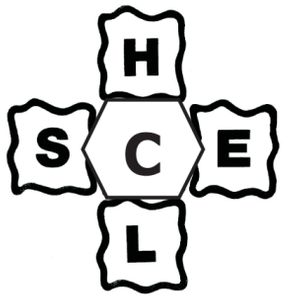
При пилотировании классического самолета значительный вклад в общее число аварий вносит ошибочная деятельность летчика [14, 15, 17–19]. Этому соответствовал человекоцентристский подход в авиационной авариологии. Концептуальная модель SHEL Эдвардса, 1972 и Хоукинса, 1975 (рис. 5) [19] основывается на важности согласованного функционирования «узлового элемента» системы – внешнего пилота-оператора со смежными блоками (компонентами) модели. Остальные компоненты должны соответствующим образом адаптироваться с этим «узловым элементом». Несовместимость границ блоков с ее узловым «элементом» пилотом-оператором может быть источником ошибок пилотов и привести к авариям БЛА.

При переходе на автоматизацию управления полетом начинает преобладать роботизированный подход к структуре управления полетом. Концептуальная модель SHEL приобретает вид

S – Software (процедуры, символы и т.д.);
H – Hardware (машина);
E – Environment (среда);
L – Liveware (человек).

В этой модели совпадающие или несовпадающие границы блоков (интерфейс) важны как и характеристики самих блоков. Несовпадение границ может быть источником человеческих ошибок.

Рис. 5. Концептуальная модель SHEL по Эдвардсу, 1972, и Хоукинсу, 1975 [16]:
L (Liveware) – субъект – человек, пилот-оператор;
H (Hardware) – объект – машина, самолет;
S (Software) – процедуры – правила, инструкции и руководства;
E (Environment) – среда – условия, в которых взаимодействуют компоненты модели



C – Computer (компьютер);
S – Software (процедуры, символы и т.д.);
H – Hardware (машина);
E – Environment (среда);
L – Liveware (человек).

В этой модели совпадающие или несовпадающие границы блоков (интерфейс) важны как и характеристики самих блоков. Несовпадение границ может быть источником ошибок управляющих систем.

Рис. 6. Концептуальная модель CSHEL по Эдвардсу, 1972, и Хоукинсу, 1975, в варианте, модифицированном авторами:
C (Computer) – бортовой компьютер, компьютерная программа полета (computer flight program);
H (Hardware) – объект – машина, самолет;
S (Software) – процедуры – правила, инструкции и руководства;
E (Environment) – среда – условия, в которых взаимодействуют компоненты модели;
L (Liveware) – субъект – человек, пилот-оператор

CSHEL (рис. 6), и «узловым элементом» системы становится Программа полета – компьютер, программируемая среда и компьютерные модели, которые создает программист. Программа полета должна предусматривать ее эффективное и адекватное взаимодействие с остальными компонентами модели.

При таком подходе, как подтверждается и практикой использования MQ-9, уменьшается общее число аварий на всех этапах полета ввиду совершенства конструкции планера, двигателя, систем управления полетом, связи, программного обеспечения и др. Повышается автономность полета БЛА, что важно в условиях воздействия средств радиоэлектронной борьбы. Так, установленные на «Альтиус РУ» элементы искусственного интеллекта должны снизить нагрузку на пилотов-операторов беспилотных комплексов, что особенно важно при длительных, более суток, полетах и патрулировании [20]. Это значительно отличается от прежних режимов использования БЛА, при которых военные беспилотники на всех этапах полета контролировались пилотами-операторами, работающими с земли.

Однако, как показал проведенный анализ и данные других исследований [16, 17], достаточно высокий уровень аварий по вине ошибочных действия пилота-оператора сохраняется, особенно на этапе посадки. Кроме того, повышается значимость разработки программ полетного задания, которые должны быстро реагировать на разные, порой резко меняющиеся условия полета, а также важность обеспечения надежности функционирования аппаратно-программного комплекса, в том числе бесперебойного энергоснабжения.

Можно заключить, что роль пилота-оператора в предупреждении аварий БЛА и при высоком уровне автоматизации полета остается довольно значимой [17, 21, 22]. Как подчеркнуто в работе [23], чем «умнее» роботы, тем больше риски при отказах программ и поломках. С учетом этого разрабатываемые подходы к снижению аварийности должны включать повышение уровня квалификации пилотов-операторов, применение в процессе их обучения современных тренажеров с функцией виртуальной реальности полета, использование при этом учебных заданий с нестандартными стрессовыми ситуациями [24, 25]. Представляется также эффективным направлением снижения аварийности использование в качестве пилотов-операторов высококвалифицированных профессиональных летчиков с большим опытом летной работы, после дополнительного обучения их функциям пилота-оператора при удаленном управлении БЛА [26, 27].

Выводы

1. Анализ аварийности БЛА необходимо проводить для установления общих закономерностей причин аварий на разных моделях самолётов, при разных особенностях их использования и на разных этапах полета.
2. При учебных полетах БЛА в причинах аварий преобладали (60–64,7 %) ошибки пилота, пилота-инструктора на всех этапах полета и особенно при посадке.
3. При использовании БЛА в третьих странах уменьшался вклад причин ошибок пилота и техника (19,4–22,9 %) и преобладала доля технологических причин аварий (77,1–80,6 %), что было связано с

внезапным усложнением метеообстановки и условий полета, а также с конструктивными проблемами, обусловленными продолжительностью эксплуатации техники при значительно большем времени полета каждого самолета.

4. Разработка подходов к снижению аварийности БЛА должна включать в качестве важного направления повышение уровня обучения пилотов-операторов, применение в процессе обучения современных тренажеров с функцией виртуальной реальности полета, использование при этом учебных заданий с нестандартными стрессовыми ситуациями, в том числе с моделированием сочетанных причин аварий.

Список литературы

1. *Тикшаев В.Н., Барвиненко В.В.* Проблема борьбы с беспилотными летательными аппаратами и возможные пути ее решения // Военная мысль. 2021. № 1. С. 125–132.

Tikshaev V.N., Barvinenko V.V. The problem of fighting unmanned aerial vehicles and likely ways of dealing with that // Voennaya mysl'. 2021. № 1. P. 125–132.

2. *Виноградова Е.* Как автоматизированный транспорт повлияет на экономику страны. 13 июля 2021. URL: https://iz.ru/1191933/ekaterina-vinogradova/i-vzletim-i-poplavaem-na-razvitie-bespilotnikov-potratiat-bolshe-800-mlrd.

Vinogradova E. How will automated transport affect the country's economy. July 13, 2021. URL: https://iz.ru/1191933/ekaterina-vinogradova/i-vzletim-i-poplavaem-na-razvitie-bespilotnikov-potratiat-bolshe-800-mlrd.

3. *Cole Ch.* Accidents will happen: A dataset of military drone crashes. June 2019. URL: https://dronewars.net/2019/06/09/accidents-will-happen-a-dataset-of-military-drone-crashes/.

4. *Chow E., Cuadra A., Whitlock C.* Fallen from the skies (the 237 «class A» drone crashes) Jan. 19, 2016. URL: https://www.washingtonpost.com/graphics/national/drone-crashes/database/.

5. Drone Crash Database 2007–2021. URL: https://dronewars.net/drone-crash-database/.

6. *Whitlock C.* When drones fall from the sky. June 20, 2014. URL: https://www.washingtonpost.com/sf/investigative/2014/06/20/when-drones-fall-from-the-sky/.

7. Drone Crash Dataset 2009–2018. URL: https://dronewars.net/dronecrash2009-2018/.

8. *Пономаренко В.А., Ступаков Г.П., Ушаков И.Б. и др.* Стратегия повышения безопасности полетов авиации России на основе концепции человеческого фактора // Человек и безопасность полетов: Научно-практические аспекты снижения авиационной аварийности по причине человеческого фактора. М., 2013. С. 73–84.

Ponomarenko V.A., Stupakov G.P., Ushakov I.B. et al. Strategy for improving the safety of Russian aviation flights based on the concept of the human factor // Man and flight safety: Scientific and practical aspects of reducing aviation accidents due to the human factor. Moscow, 2013. P. 73–84.

9. *Асташкин Д.Г.* Концептуальные взгляды командования ВВС США на развитие беспилотной авиации // Сборник докладов и статей по материалам II науч.-практ. конф. «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами» Коломна, 2017. С. 183–196.

Astashkin D.G. Conceptual views of the US Air Force Command on the development of unmanned aviation // Collection of reports and articles based on the materials of the II scientific and practical conference «Prospects for the development and application of complexes with unmanned aerial vehicles». Kolomna, P. 183–196.

10. United States Air Force Unmanned Aerial System Flight Plan 2009–2047. Headquarters United States Air Force, 2009.

11. *Donald D.* U.S. Air Force Ends Predator Operations. March 13, 2018. URL: https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2018-03-13/us-air-force-ends-predator-operations.

12. General Atomics MQ-1 Predator. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator.

13. General Atomics MQ-9 Reaper. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper.

14. *Пономаренко В.А.* Страна Авиация – черное и белое. М., 1995.

Ponomarenko V.A. Country Aviation – black and white. Moscow, 1995.

15. Хрестоматия человеческого фактора в авиации через призму безопасности полетов. М., 2010. Т. 1; 2011. Т. 2.

Anthology of human factors in aviation through the prism of safety. Moscow, 2010. V. 1; 2011. V. 2.

16. When drones fall from the sky. 2014. URL: https://www.washingtonpost.com/sf/investigative/2014/06/20/when-drones-fall-from-the-sky/.

17. *Williams K.W.* A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine, Washington, DC. Technical Report Publication № DOT/FAA/AM-04/24. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/235144954_A_Summary_of_Unmanned_Aircraft_AccidentIncident_Data_Human_Factors_Implications.

18. *Гандер Д.В.* Профессиональная психопедагогика. М., 2007.

Gander D.V. Professional psychopedagogics. Moscow, 2007.

19. Руководство по обучению в области человеческого фактора, Международная организация гражданской авиации ИКАО, Doc 9683-AN/950. 1998.

Human Factors Training Guide. International Civil Aviation Organization. Doc 9683-AN/950. 1998.

20. «Альтиус». Тяжелый российский беспилотник с искусственным интеллектом. 27 марта 2020.

URL: https://topwar.ru/169438-altius-tjazhelyj-rossijskij-bespilotnik-s-iskusstvennym-intellektom.html.

«Altius». Heavy Russian drone with artificial intelligence. March 27, 2020. URL: https://topwar.ru/169438-altius-tjazhelyj-rossijskij-bespilotnik-s-iskusstvennym-intellektom.html.

21. *Гандер В.Д., Лысаков Н.Д*. Психологические аспекты управления беспилотными летательными аппаратами // Человеческий капитал. 2017. № 3. С. 41–42.

Gander D.V., Lysakov N.D. Psychological aspects of operation of unmanned aerial vehicles // Chelovecheskiy kapital. 2017. № 3. P. 41–42.

22. *Бубеев Ю.А., Усов В.М., Крючков Б.И. и др*. Способность оператора к ведению пространственной ориентировки при дистанционном управлении беспилотными аппаратами в виртуальной среде // Авиакосм. и экол. мед. 2021. Т. 55. № 3. С. 16–27.

Bubeev Yu.A., Usov V.M., Kryuchkov B.I. et al. Operator's spatial orientation ability during control of remotely-piloted aircraft in virtual reality // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2021. V. 55. № 3. P. 16–27.

23. *Бухтияров И.В., Денисов Э.И*. Гигиенические аспекты роботизации: факторы риска и принципы безопасности // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 1. С. 6–12.

Bukhtiyarov I.V., Denisov E.I. Hygienic aspects of robotization: risk factors and safety principles // Gigiena i sanitariya. 2021. V. 100. № 1. P. 6–12.

24. *Злотников К.А., Волосюк А.А., Тан Х.А*. Особенности человеческого фактора в беспилотной авиации и подготовка операторов беспилотных летательных аппаратов // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах: Труды Второй Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 231–237.

Zlotnikov K.A., Volosyuk A.A., Tan Kh.A. Human factors in unmanned aviation and unmanned aircraft system operators training // Works of the Second International Scientific and Practical Conference. 2016. P. 231–237.

25. *Величковский Б.Б*. Инженерно-психологические проблемы проектирования интрефейсов управления беспилотными летательными аппаратами // Национальный психол. журнал. 2020. № 1 (37). С. 31–39.

Velichkovskiy B.B. Engineering-psychological problems of unmanned aerial vehicles interface design // Natsional'nyy psikhologicheskiy zhurnal. 2020. № 1 (37). P. 31–39.

26. Guidance for the training of unmanned aircraft systems (UAS) operators – NATO STANDARD ATP-3.37, Edition B, Version 1. 2014.

27. National UAV Mission Training Concept. Canada, Quebec: National UAV Mission Training Centre, 2007.

Поступила 18.01.2022

ANALYSIS OF THE SIGNIFICANCE OF FACTORS CONTRIBUTING TO THE PILOTLESS VEHICLE ACCIDENT RATE: CHOOSING THE PATH OF ANALYSIS

Burmistrov V.I.[1], Ivanov I.V.[1, 2], Matkevich E.I.[1], Praskurnichiy E.A.[3]

[1]Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)
[2]State Scientific-Research Test Institute of Military Medicine of Defense Ministry of the Russian Federation, Saint-Petersburg
[3]Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow

Analysis of the air accident rates of MQ-1 Predators and MQ-9 Reapers from the Drone Crash Database in the period from 2001 till 2021 (12 countries, 174 accidents total) disclosed major factors, including human, for accidents.

The main reason was structural faults and manufacturing defects due to, probably, long time in service. Frequency of accidents due to errors of experienced pilot-operator's varied between 19.4% and 22.9 % and due to errors in the course of skill training, 60–64.7 %. To reduce the accident rate, pilot-operators need to be trained on cutting-edge VR simulators and challenged by atypical stress situations such as multiple causation.

Key words: flight safety, pilotless vehicle, accident rate, air accident prevention, external pilot, pilot-operator, human factor.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 73–84.

УДК 693.3

ГИГИЕНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ШУМА, ГЕНЕРИРУЕМОГО АЭРОДРОМНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Солдатов С.К.[1], Драган С.П.[2], Богомолов А.В.[1, 2], Пирожков М.В.[3], Скрябин С.Ю.[1], Городенко О.В.[1], Синельников И.А.[4]

[1]Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва
[2]Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
[3]Центральный научно-исследовательский институт точного машиностроения, г. Подольск
[4]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

E-mail: soldatov2304@yandex.ru

Статья посвящена оценке акустических условий труда инженерно-технического состава (ИТС), обслуживающего современные авиационные комплексы.

Измерения проводились на 4 объектах аэродрома государственной авиации для определения амплитудно-временных характеристик сигнала, спектральных (в октавных полосах частот от 2 до 16 000 Гц), а также общего уровня инфразвука, максимального уровня звука (L_A, дБ) и эквивалентного уровня звука А ($L_{Аэкв}$, дБ).

Установлено, что аэродромный кондиционер типа АК-04-01 является источником высокоинтенсивного широкополосного шума, характер и интенсивность которого зависели от места нахождения и режима работы.

Акустические измерения на открытой площадке, на рабочих местах ИТС в режиме предполетной подготовки самолета истребительно-бомбардировочной авиации (ИБА), на рабочих местах ИТС в ангаре и при подготовке самолета к полетам при работе аэродромного кондиционера показали, что уровень звука А изменялся от 97 до 114 дБ.

Характер акустических условий, связанный с особенностями профессиональной деятельности ИТС, предполагает создание благоприятных условий работы путем проведения организационных и индивидуальных защитных мероприятий, в том числе с использованием противошумных наушников и шлемов.

Ключевые слова: авиационный шум, аэродромный кондиционер, акустические параметры, шумозащитные мероприятия.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 85–89.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-85-89

Авиационный шум остается одним из самых важных факторов негативного влияния на здоровье работающих [1, 2]. Под его воздействие попадает сравнительно большое число людей, к которым относится персонал аэродромов государственной авиации (ГА).

Проведенные исследования позволяют утверждать, что в настоящее время шумовой фактор на рабочих местах авиационных специалистов является главным фактором риска развития специфической и общесоматической патологии, требующим проведения постоянного социально-гигиенического мониторинга и осуществления соответствующих профилактических медицинских и организационно-технических мероприятий [1, 3, 4].

Длительная и систематическая работа в условиях шума способствует развитию усталости, повышенной утомляемости, снижению внимания, трудоспособности, что в конечном итоге приводит к ухудшению надежности выполнения профессиональных задач [5]. Поэтому актуальной является задача систематического контроля акустической обстановки на рабочих местах инженерно-технического состава (ИТС) аэродромов ГА.

Исходя из вышеизложенного, целью нашей работы явилась гигиеническая оценка акустических условий на рабочих местах ИТС при работе мощного авиационного оборудования в период предполетной подготовки.

Методика

Для регистрации акустических сигналов использовали следующую аппаратуру: конденсаторные микрофоны фирмы «Брюль и Къер», тип 4133 и ВМК-201; прецизионный шумомер фирмы «Брюль и Къер», тип 2231; цифровой регистратор Gitac A-320 в комплекте с 16-канальным АЦП Darkcard-16 EM1.

Акустические параметры на рабочих местах авиационных специалистов были измерены на следующих объектах аэродрома ГА:

1. На открытой площадке при работе аэродромного кондиционера (тип АК-04-01).

2. На рабочих местах ИТС в режиме предполетной подготовки самолета истребительно-бомбардировочной авиации (ИБА) при работе аэродромного кондиционера.

3. На рабочих местах ИТС в ангаре при подготовке самолета к полетам при работе аэродромного кондиционера, расположенного в ангаре.

4. На рабочих местах ИТС в режиме предполетной самолета на стоянке аэродрома при работе силовых установок воздушного судна (ВС).

5. На рабочих местах ИТС от другой аэродромной техники – от аэродромного подвижного электроагрегата (АПА) и аэродромного многоцелевого кондиционера (АМК) на базе автомобиля ЗИЛ.

Измерения проводились для определения амплитудно-временных характеристик сигнала, спектральных (в диапазоне от 2 до 16 000 Гц), а также параметра общего уровня звукового давления (L), уровня звука А ($L_А$, дБ) и эквивалентного уровня звука А ($L_{Аэкв}$, дБ). В качестве нормативных документов, регламентирующих уровни звука на рабочих местах, применялись санитарные нормы [6]. В качестве нормируемых показателей шума представлены уровни звукового давления (УЗД – L, дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, а также эквивалентный (по энергии) уровень звука А ($L_{Аэкв}$, дБ) [7], уровни звукового давления в октавных полосах 2, 4, 8 и 16 Гц, а также общий уровень инфразвука (L, дБ).

Дополнительно определялась относительная доза шума при каждом исследуемом режиме, которая вычислялась по формуле [8]

$$D_{отн} = D_{факт} / D_{доп},$$

где $D_{отн}$ – относительная доза шума, отн.ед.; $D_{факт}$ – фактическая доза шума; $D_{доп}$ – допустимая доза шума.

Результаты и обсуждение

Аэродромный кондиционер (тип АК-04-01) смонтирован на базе автомобиля КамАЗ. Акустические измерения были проведены при расположении автомобиля на открытой площадке на рабочем месте водителя в кабине, а также справа и слева от кондиционера, расположенного на грузовой платформе при работе в режиме предполетной подготовки (избыточное давление 0,31 кгс/см2 с одним нагнетателем).

В кабине водителя автомобиля во время работы нагнетателя уровень звука А составил 70 дБ. По характеру спектра шум является широкополосным, так как он непрерывен и представлен во всех измеряемых октавах от 2 до 8000 Гц. Максимум спектра приходится на октавные полосы со среднегеометрической частотой 31,5 Гц при УЗД 90 дБ и 16 Гц при УЗД 87 дБ. Расчеты эквивалентного уровня звука А относительно рабочей смены (8 ч) показали, что при работе аэродромного кондиционера при минимальной загрузке в течение рабочей (1 ч) и максимальной (7 ч) смены уровни звука не превысят ПДУ (80 дБА) и составят соответственно $L_{Аэкв}$ = 61 дБА и $L_{Аэкв}$ = 69 дБА.

Таким образом, при работе АК-04-01 в штатном режиме на рабочем месте водителя образуется постоянный широкополосный низкочастотный шум и инфразвук. УЗД и уровень шума соответствовали ПДУ.

Слева от кузова автомобиля на расстоянии 2–3 м уровень звука А составил 92 дБ. В области инфразвука УЗД в октавных полосах и общий УЗД не превышали ПДУ. Справа от кузова автомобиля на расстоянии 2–3 м уровень звука А составил 109 дБ. В области инфразвука УЗД в октавных полосах и общий УЗД не превышали ПДУ.

Проведены акустические измерения в данной точке при включении различного количества нагнетателей при работе АК-04-01 в штатном режиме. Установлено, что при работе 1 нагнетателя справа от кузова образуется шум с $L_А$ = 98 дБА, 2 нагнетателей – $L_А$ = 108 дБА и 3 нагнетателей – $L_А$ = 112 дБА.

Аэродромный кондиционер типа АК-04-01 является источником высокоинтенсивного широкополосного шума. Характер и интенсивность шума зависят от места нахождения и режима работы. Наиболее неблагоприятная акустическая обстановка возникает справа от кузова автомобиля.

Акустические измерения на рабочих местах ИТС в режиме предполетной подготовки самолета ИБА на стоянке аэродрома проводили при работе аэродромного кондиционера, который располагался справа от самолета на расстоянии 2–3 м правым боком и работал в штатном режиме. Измерения провели в 7 точках, которые были определены на основании циклограммы работы ИТС при предполетной подготовке данного типа самолета (справа и слева от передней стойки, около правой и левой задних стоек, на стремянке справа на уровне кабины самолета, в кабине самолета при открытом и закрытом фонаре). Уровень звука А в этих точках изменялся от 93 до 112 дБ. Максимальных значений этот показатель достигал справа от передней стойки – 112 дБ. В инфразвуковом диапазоне УЗД выявлено незначительное превышение в октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц – 88 дБ, но при этом общий УЗД находился в диапазоне 67–88 дБ, т.е. не превышал норму.

С учетом характера работы в период предполетной подготовки технический персонал периодически перемещается из одной точки в другую, которые имеют разный уровень шума, т.е. ИТС подвергается воздействию высокоинтенсивного непостоянного

широкополосного шума. Нормируемой характеристикой непостоянного шума является эквивалентный уровень звука А за рабочую смену. Расчет этого показателя выявил, что при работе аэродромного кондиционера при минимальной загрузке в течение рабочей смены (один вылет – время предполетной подготовки составит 2 ч) $L_{Аэкв}$ составит 93 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) на 13 дБА, а при максимальной загрузке (4 вылета – суммарное время предполетной подготовки составит 6,5 ч) – $L_{Аэкв}$ = 103 дБА, что выше ПДУ на 23 дБА.

При применении традиционной аэродромной техники (таблица) также установлено превышение значений звука по эквивалентному уровню для рабочей смены и по октавным частотам для максимальной летной загрузки. Более современный кондиционер АК-04-01 создает, как показали расчеты, более высокие уровни шума, что, безусловно, требует выбора и конструирования шумозащитных средств, в том числе с использованием оптимизации [1].

Дозный подход к оценке акустической обстановки показал, что относительная доза шума, действующего на ИТС при работе аэродромного кондиционера АК-04-01, при минимальной загрузке за смену превысит допустимую в 55,3 раза, а при максимальной загрузке – в 216,1 раза.

Акустические измерения на рабочих местах ИТС в ангаре при подготовке самолета к полетам при работе аэродромного кондиционера показали, что уровень звука колебался от 97 до 106 дБА. Максимальных значений этот показатель достигал справа от передней стойки – 106 дБА. В инфразвуковом диапазоне УЗД и общий УЗД не превышали нормативных величин.

Расчет эквивалентного уровня шума относительно рабочей смены (8 ч) показал, что при работе аэродромного кондиционера в ангаре при минимальной загрузке в течение рабочей смены (2 ч) L_A на рабочих местах около самолета будет находиться в диапазоне от 91 до 100 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) от 11 до 20 дБА, а при максимальной загрузке (5 ч) L_A составит 95–104 дБА, что выше ПДУ на 15–24 дБА.

Относительная доза шума, действующая на ИТС при работе кондиционера в ангаре при минимальной загрузке за смену, превысит допустимую от 15,8 до 39,5 раза в зависимости от места нахождения, а при максимальной загрузке – от 31,6 до 249,6 раза.

При работе силовых установок самолета (режим запуска) на рабочих местах ИТС образуется высокоинтенсивный непостоянный широкополосный шум и инфразвук. В области инфразвука УЗД в октавных полосах со среднегеометрической частотой 8 и 16 Гц соответствуют 95 и 96 дБ, что превышает ПДУ соответственно на 5 и 11 дБ. Общий УЗД составляет 101 дБ Лин, т.е. на 1 дБ Лин превышает

Таблица

Результаты измерений параметров уровней звука А на рабочих местах ИТС при работе аэродромной техники при обслуживании самолетов ИБА за рабочую смену

№	Место измерения	Источник шума	$L_{Аэкв}$, дБ	Эквивалентные по энергии уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
				2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Рабочие места ИТС	АПА	92,5*			58,2	64,2	81,1	78,4	86,3	81,5	83,0*	84,8*	83,0*	77,4*	70,9*
2		АПА + АМК	97,2*			67,7	72,5	87,5	91,4	91,5*	86,2*	84,3*	85,0*	83,9*	78,0*	70,6*
3		АМК	96,2*			61,3	71,6	87,1	91,8	91,3*	83,8*	81,2*	79,1*	79,5*	72,8*	63,9

Примечание. АПА – аэродромный подвижной электроагрегат; АМК – аэродромный многоцелевой кондиционер на базе автомобиля ЗИЛ; * – значения, превышающие ПДУ.

ПДУ (100 дБ Лин). В звуковом диапазоне максимум спектра приходится на область 2000–4000 Гц. В октавных полосах со среднегеометрической частотой от 63 до 8000 Гц УЗД превышали ПДУ от 3 до 40 дБ. Расчет эквивалентного уровня шума на рабочих местах ИТС показал, что при минимальной загрузке в течение рабочей смены (один вылет за летную смену) $L_{Аэкв}$ составит 107 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) на 27 дБА, а при максимальной загрузке (4 вылета за летную смену) $L_{Аэкв}$ – 113 дБА, что выше ПДУ на 33 дБА.

Расчет дозы показал, что относительная доза при минимальной загрузке превысит допустимую в 496,1 раза, а при максимальной – в 1775,9 раза.

В период предполетной подготовки обслуживающий персонал будет дополнительно подвергаться воздействию шума при работе аэродромного кондиционера, что приведет к увеличению эквивалентного уровня звука до 108 дБА при минимальной загрузке в летную смену и до 114 дБА при максимальной, а значит, и возрастет относительная доза соответственно до 553 и 1990,8 раза. Необходимо учитывать и временной фактор действия шума. В штатных условиях ИТС подвергается воздействию шума при работе силовых установок истребителя в период предполетной подготовки в течение 10–15 мин при одном вылете, при обслуживании изделия время действия шума займет весь период предполетной подготовки и увеличится до 1,5–2 ч при каждом вылете.

В соответствии с «Руководством» [9] в большинстве случаев условия труда ИТС при эксплуатации самолетов ИБА соответствуют вредным условиям труда (3-й класс). Они характеризуются наличием шума и инфразвука, уровни которых превышают гигиенические нормативы и оказывают неблагоприятное действие на организм ИТС.

На основании проведенных измерений были разработаны предложения по улучшению условий труда ИТС при работе мощного аэродромного оборудования, заключающиеся в проведении следующих шумозащитных мероприятий:

1. В период предполетной подготовки аэродромный кондиционер (тип АК-04-01) должен стоять к обслуживаемому им самолету левым боком. Это может привести к снижению уровня шума на рабочих местах на 17 дБА, а значит, уменьшить акустическую нагрузку на персонал.

2. При подготовке самолета к полетам в ангаре можно использовать 2 способа по улучшению акустической обстановки. При первом способе, по аналогии с вышеизложенным пунктом, аэродромный кондиционер следует располагать либо справа от самолета левым боком, либо ставить его слева от самолета правым боком. Проведенные нами испытания в последнем варианте показали, что можно добиться снижения уровня шума на 4–5 дБ. Второй способ более радикален. АК-04-01 должен находиться вне зоны закрытого помещения, т.е. вне ангара на открытой местности.

3. Рассмотреть вопрос с разработчиком АК-04-01 на предмет возможности удлинения шланга, соединяющего кондиционер с самолетом, или снижения шумности с использованием новых технологий по звукоизоляции и звукопоглощению.

4. Обеспечить ИТС, принимающии участие в обслуживании соответствующих изделий, средствами индивидуальной защиты (СИЗ) от шума. Наиболее оптимальным средством при работе аэродромного кондиционера являются противошумные наушники с эффективностью в области средних частот не менее 25 дБ (показатель М) и общей эффективностью не менее 30 (показатель SNR). При работе силовых установок воздушного судна для эффективной защиты требуется применение шумозащитного шлема.

Выводы

1. Установлено, что аэродромный кондиционер (типа АК-04-01) является источником высокоинтенсивного постоянного широкополосного низко- и высокочастотного шума. Характер и интенсивность шума зависит от места нахождения и режима работы. Наиболее неблагоприятная акустическая обстановка возникает справа от кузова – уровень звука составил 109 дБА. Максимум спектра приходится на октавную полосу со среднегеометрической частотой 1000 Гц при УЗД 105 дБ, т.е. выше допустимой величины на 25 дБ (ПДУ 80 дБ).

2. При работе аэродромного кондиционера в штатном режиме на рабочих местах ИТС в период предполетной подготовки образуется широкополосный шум. УЗД в октавных полосах и уровень шума существенно превышают ПДУ. При минимальной загрузке в течение рабочей смены (один вылет 2 ч) $L_{Аэкв}$ составит 93 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) на 13 дБА, а при максимальной загрузке (4 вылета) $L_{Аэкв}$ = 103 дБА, что выше ПДУ на 23 дБА.

3. При работе аэродромного кондиционера в штатном режиме на рабочих местах ИТС в ангаре в период подготовки самолета ИБА к полетам образуется высокоинтенсивный широкополосный шум. УЗД и уровень шума существенно превышают ПДУ. При минимальной загрузке в течение рабочей смены (2 ч) L_A на рабочих местах около самолета будет находиться в диапазоне от 91 до 100 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) от 11 до 20 дБА, а при максимальной загрузке (5 ч) – L_A составит 95–104 дБА, что выше ПДУ на 15-24 дБА.

4. При работе силовых установок ВС в период предполетной подготовки на рабочих местах ИТС формируется высокоинтенсивный непостоянный широкополосный высокочастотный шум. УЗД и

уровень шума существенно превышают ПДУ. При минимальной загрузке в течение рабочей смены (один вылет за летную смену) $L_{Аэкв}$ составит 107 дБА, т.е. превысит ПДУ (80 дБА) на 27 дБА, а при максимальной загрузке (4 вылета за летную смену) $L_{Аэкв}$ – 114 дБА, что выше ПДУ на 34 дБА.

Список литературы

1. *Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Драган С.П., Кукушкин Ю.А.* Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. М., 2019.

Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Kukushkin U.A. Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics. Moscow, 2019.

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

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

3. *Иванов А.И., Корсун О.Н., Меркулова А.Г., Булгакова М.В., Нахаев М.З.* Экспериментальное исследование взаимосвязи характеристик речи и состояние слуха у летного состава с нейросенсорной тугоухостью: пилотное исследование // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 5. С. 58–62.

Ivanov A.I., Korsun O.N., Merkulova A.G., Bulgakova M.B., Nakhaev M.Z. Experimental study of the relationship between the characteristics of speech and hearing status in flight personnel with sensorineural hearing loss: pilot study // Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 2017. № 5. P. 58–62.

4. *Воробьев О.А., Крылов Ю.В., Зарицкий В.В.* Авиационный шум как экологический фактор среды обитания // Медицина труда и промышленная экология. 1995. № 3. С. 11–14.

Vorobyev O.A., Krylov Yu.V., Zaritsky V.V. Aviation noise as an ecological factor of the habitat // Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 1995. № 3. P. 11–14.

5. *Крылов Ю.В.* Авиационный шум // Справочник авиационного врача. М., 1992. С. 165–188.

Krylov Yu.V. Aviation noises // Handbook of an aviation doctor. Moscow, 1992. P. 165–188.

6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. С. 469.

SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans from environmental factors. Moscow, 2021. P. 469.

7. ГОСТ ISO 9612-2016. Акустика. Измерения шума для оценки воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах. М., 2019. С. 46.

GOST ISO 9612-2016. Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Moscow, 2019. P. 46.

8. *Денисов Э.И.* Принципы дозной оценки шума // Шум и вибрация. М., 1982. С. 99–106.

Denisov E.I. Principles of does estimation of noise // Noise and vibration. Moscow, 1982. P. 99–106.

9. Руководство Р 2.2.1766-03 по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. М., 2004. С. 24.

Manual R 2.2.1766-03 on the assessment of occupational health risks for employees. Organizational and methodological foundations, principles and evaluation criteria. Moscow, 2004. P. 24.

Поступила 25.02.2022

HYGIENIC ASPECTS OF THE NOISE GENERATED BY AERODROME FACILITIES

Soldatov S.K.[1], Dragan S.P.[2], Bogomolov A.V.[1, 2], Pirozhkov M.V.[3], Skriabin S.Yu.[1], Gorodenko O.V.[1], Sinelnikov I.A.[4]

[1]Research and Test Center (Aerospace Medicine and Military Ergonomics) of the Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

[2]A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA of Russia, Moscow

[3]Central Research Institute for Precision Machinery Industry, Podolsk

[4]Kirov Military Medical Academy, St.-Petersburg

The paper deals with analysis of the technical staff acoustic environment in modern aviation facilities.

Measurements in 4 aerodrome sites were aimed to determine signal amplitude and temporal characteristics, spectral (octave band 2 to 16 000 Hz), and levels of total infrared, maximal (L_A, dB) and equivalent sound (L_{Aeq}, dB).

It was found that the aerodrome conditioner is a source of high-intensity wide-band noise with character and intensity dependent on the conditioner location and operation mode.

Noise measurements on esplanade and work stations during flight preparation of a fighter-bomber, and in the hanger with the aerodrome conditioner on showed that the equivalent sound varied in the range from 97 to 114 dB.

Health effects of this acoustic environment should be reduced using engineering controls and personal protectors.

Key words: aviation noise, aerodrome conditioner, noise indicators, noise control.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 85–89.

МЕТОДИКИ

УДК 629.7.048:612.2

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕНОСИМОСТИ ДЕКОМПРЕССИИ ЧЕЛОВЕКОМ В РАЗГЕРМЕТИЗИРОВАННОЙ ГЕРМОКАБИНЕ

Матюшев Т.В.[1], Дворников М.В.[1], Рыженков С.П.[1], Максимова И.Д.[2], Рыбина А.С.[2], Малышев А.Д.[2], Носков Р.Г.[3]

[1]Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва
[2]Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
[3]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова, Москва

E-mail: mtv4465@yandex.ru

В статье представлена методика оценки переносимости декомпрессии человеком на основе комплексной имитационной модели газодинамических процессов, имеющих место в секционированных гермокабинах (ГК) летательных аппаратов (ЛА) при разгерметизации. Модель, сформированная на основе существующих подходов к моделированию процесса разгерметизации кабины, позволяет учесть влияние декомпрессии на организм летчика в зависимости от параметров полета и характеристик кабины, а также изменения режимов автоматического регулирования давления. Проведены вычислительные эксперименты, имитирующие декомпрессию при разгерметизации на высоте. Были определены время декомпрессии, величина перепадов между секциями-отсеками при изменении давления, величина массовой подачи при изменении давления, величина безопасной высоты снижения.

Предлагаемая методика позволяет на стадии проектирования ЛА провести рациональный выбор герметических и газодинамических параметров кабины, а также летно-эксплуатационных характеристик с учетом возможной декомпрессии кабины в полете или, наоборот, при заданных параметрах ГК и летных данных оценить степень опасности при разгерметизации и заранее предусмотреть комплекс средств по обеспечению безопасности.

Ключевые слова: разгерметизация, коэффициент расхода, декомпрессия, стратосфера, имитационная модель, физиологические факторы, высотно-декомпрессионная болезнь, гипоксия, баротравма.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 90–97.

DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-2-90-97

Основным средством защиты человека от воздействия внешней среды и поддержания необходимых физиолого-гигиенических условий нормальной жизнедеятельности и работоспособности в условиях высотного полета является гермокабина (ГК), в которой параметры внутренней среды регулируются так, чтобы обеспечить не только сохранение жизни, но и поддержание работоспособности на необходимом уровне. Обычно в работах, посвященных вопросам декомпрессии кабин летательного аппарата (ЛА), внезапная разгерметизация с физиологической точки зрения рассматривается как сумма опасных для организма человека факторов: уменьшение парциального давления кислорода, опасность относительного расширения газов, явление декомпрессии на больших высотах [1]. Воздействие этих факторов может привести к серьезным нарушениям и повреждениям в организме, вплоть до летальных исходов. Для учета влияния этих факторов на организм летчика на этапе проектирования ЛА необходим методический и алгоритмический аппарат анализа систем автоматического регулирования давлений (САРД), обеспечивающих комфортные условия и защиту летчика от неблагоприятных факторов высотного полета [2].

Необходимость методики оценки переносимости декомпрессии человеком при вынужденной разгерметизации ГК определена тем обстоятельством, что существующие средства регулирования давления воздуха в ГК не учитывают в полной мере:

– технические возможности и ограничения существующих средств разработки и регулирования параметров воздуха в кабине ЛА;

– физиолого-гигиенические эффекты, воздействующие на экипаж в процессе их деятельности в штатных и аварийных ситуациях;

– потенциальные технические возможности, использования других средств и способов оптимизации условий деятельности экипажа при выполнении маневренных (высокоманевренных) и высотных (стратосферных) полетов в штатных и аварийных условиях.

Существующие ограничения технических средств регулирования давления в ГК обусловлены традиционными задачами регулирования, которые направлены на выдерживание заданных параметров градиента давления, а не поддержание постоянства величины давления с учетом физиологических потребностей организма. Источниками воздуха, подаваемого в ГК, являются двигатели различного типа и принципов работы. Однако основное их назначение состоит в обеспечении их же работы, а функция подачи воздуха в кабину и технические отсеки является вспомогательной. Вопросы расширения функциональных возможностей авиационных двигателей в интересах оптимизации микроклиматических условий в кабине для экипажа и пассажиров в настоящее время не рассматриваются.

Перспективным способом оптимизации режимов регулирования давления в ГК может стать математическое моделирование, учитывающее возможности и ограничения перераспределения объемов подачи воздуха для компенсации появившейся утечки. Поэтому целью работы является разработка методики оценки переносимости декомпрессии человеком в стратосферном полете при разгерметизации на основе комплексной имитационной модели газодинамических процессов, имеющих место в секционированных ГК ЛА. Данная методика позволит теоретически оценить величину резервного времени в зависимости от уровня переносимости воздействия.

Для достижения поставленной цели нам необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать имитационную модель декомпрессии при разгерметизации на основе существующих подходов к моделированию процесса разгерметизации кабины, позволяющую учитывать влияние декомпрессии на организм летчика в зависимости от параметров полета и характеристик ГК и изменения режимов функционирования САРД.

2. На основе вычислительных экспериментов разработать методику оценки переносимости декомпрессии человеком, учитывающую различные уровни переносимости воздействия.

Имитационная модель декомпрессии гермокабины при разгерметизации

Проблема обеспечения безопасности при разгерметизации имеет две жизненно важные стороны – физиологическую и техническую. Рассматривать при исследовании только одну из этих сторон было бы неправильно. В самом деле, нелогично предусматривать мероприятия по физиологической защите, если люди могут погибнуть в результате разрушения конструкции или потери управляемости. Следовательно, только комплекс мероприятий, предусматривающих как физиологическую, так и прочностную защиту, может обеспечить безопасность полета и сохранение жизни экипажа, а следовательно, и исследование этой проблемы должно быть комплексным. Именно концепция комплексного рассмотрения всей проблемы в целом как с физиологических, так и с технических точек зрения, а также выявление возможных средств и мероприятий по обеспечению безопасности положены в основу исследования.

Для решения комплексной задачи разработки имитационной модели декомпрессии при разгерметизации ГК необходимо решить 3 взаимосвязанные и взаимозависимые подзадачи:

– провести анализ существующих подходов к моделированию декомпрессии при разгерметизации кабины;

– разработать модель декомпрессии при разгерметизации;

– сформировать модель респираторной системы организма.

Анализ существующих подходов моделирования декомпрессии при разгерметизации показал, что процесс истечения газа через отверстие из ограниченной емкости не является установившимся во времени и должен рассматриваться как нестационарный процесс, обусловленный в первую очередь непрерывным изменением состояния газа, а также волновой природой рассматриваемого явления. Тем не менее зависимость расхода газа через отверстие может быть хорошо аппроксимирована формулами, разработанными в рамках теории квазиустановившихся процессов. Сравнение результатов расчетов массы и массового расхода во времени по волновой теории и теории квазиустановившихся процессов [3] показало, что зависимость массы от времени при звуковом истечении газа из сосуда конечных размеров может быть хорошо аппроксимирована с применением положений теории квазиустановившихся процессов с использованием поправочных коэффициентов (например, коэффициента расхода), что позволяет заменить рассматриваемый нестационарный процесс мнимостационарным.

Математические модели процессов истечения воздуха из отсека представлены в работах [3–7]. В этих публикациях можно выделить подходы В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина [4], М.Г. Акопова [5] и Л.Т. Быкова, М.С. Егорова, П.В. Тарасова [6, 7], основанные на позициях квазистационарной теории. В этих работах были получены следующие основные математические закономерности истечения из ГК:

– выведены эмпирические формулы для определения расхода и давления газа при докритическом и закритическом режиме истечения;

– выведены приближенные формулы для расчета времени декомпрессии ГК при постоянном давлении в атмосфере и изотермическом изменении параметров.

В работе Л.Т. Быкова и соавт. [6] представлены удобные для предварительных расчетов безразмерные зависимости декомпрессии ГК ЛА для случая изотермического состояния воздуха в ГК при истечении в среду с постоянным давлением с определением давления воздуха в процессе разгерметизации.

Во всех отмеченных выше работах, кроме В.С. Ивлентьева [3] и Л.Т. Быкова и соавт. [7], кабина рассматривалась как один герметичный объем, а процесс истечения происходил в среду с постоянными параметрами, т.е. в предложении, что высота полета в ходе процесса разгерметизации не изменяется. Однако ГК современных ЛА могут быть разделены перегородками на отдельные сообщающиеся секции или отдельные сообщающиеся друг с другом герметичные отсеки. Кроме того, в случае непредвиденной разгерметизации кабины на большой высоте экипаж примет экстренные меры по снижению ЛА на безопасную высоту и процесс истечения в этих условиях будет протекать при переменном (возрастающем) наружном противодавлении.

При качественном сравнении наиболее адекватным является подход В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина, при расчете по которому давление в конечной точке моделирования составило 42 мм рт. ст., что соответствует имитируемой высоте 20 км.

При расчете по подходам М.Г. Акопова и Л.Т. Быкова, М.С. Егорова, П.В. Тарасова используется давление 38 и 78 мм рт. ст., что искажает реальный процесс истечения газа, так как давление в конечной точке не может быть больше или меньше атмосферного.

Это приводит к тому, что процесс истечения продолжается при равенстве давлений в кабине и атмосфере. Это противоречит физическому смыслу процесса. Поэтому подход В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина мы приняли как базовый.

При разработке имитационной модели декомпрессии ГК при разгерметизации особое внимание было уделено исследованию и решению задачи об истечении воздуха из ГК самолетов в условиях переменности внешнего противодавления, т.е. в условиях экстренного снижения на безопасную высоту при внезапной декомпрессии ГК в полете. Основной задачей теории истечения газов является установление связи между расходом и параметрами газа сосуда и среды, в которую происходит истечение. ЛА можно рассматривать как сосуд, содержащий атмосферу, представляющую собой материю в газообразном состоянии. Молекулы газа, находясь на значительном расстоянии друг от друга, беспорядочно движутся внутри кабины, сталкиваясь между собой, и, непрерывно бомбардируя стенки, оказывают на них тем самым давление. Внезапное нарушение целости стенок кабины влечет за собой быстрое рассеивание находящихся в кабине газов.

Использование в инженерной постановке задачи, гипотезы квазистационарности полностью оправданно и необходимо, так как упрощает решение и способствует достижению цели при сохранении достаточной точности практического результата [3]. Исходя из этого, при исследовании приняты следующие допущения:

– термодинамический процесс разгерметизации ГК ЛА рассматривается как последовательность квазиустановившихся режимов;

– удельные теплоемкости воздуха считаются постоянными в течение всего времени разгерметизации;

– воздух принимается за идеальный газ;

– адиабатическое изменение параметров газа в отверстии не влияет на характер изменения состояния газа в объеме;

– в ГК везде реализуется равномерное распределение давления и температуры в каждый фиксированный момент времени;

– перемещение газа в объеме ГК и локальное ускорение его в отверстии разгерметизации не учитываются, т.е. состояние воздуха в кабине считается заторможенным;

– при необходимости процесс декомпрессии ГК рассматривается с точки зрения термодинамики тела переменной массы;

– альвеолы в любой момент времени имеют одинаковый состав газовой смеси, а также одинаково вентилируются и перфузируются.

Основными факторами, определяющими скорость и степень любой декомпрессии, являются объем кабины, площадь отверстия, перепад давлений. Количество газа, вытекающего из кабины через неплотности, зависит от суммы площадей всех отверстий, через которые происходит утечка [4]. Для расчета утечки реальная кабина заменяется моделью, у которой имеется лишь одно отверстие для истечения воздуха $S_y = \sum S_i$. Таким образом, ГК можно схематично представить в виде некоторого герметичного объема с отверстием постоянного сечения, через которое вытекает воздух, причем расход равен утечке. Пользуясь такой моделью, можно определить зависимость давления в кабине от времени, в течение которого происходит декомпрессия.

Рассматривались 4 участка: 1 – атмосфера; 2 – первый отсек – гермокабина и 3 – второй технический отсек; 4 – легкие человека.

Формализованное описание процесса разгерметизации было дополнено:

– условиями, определяющими параметры атмосферы, позволяющими учесть их влияние при изменении высоты на характер истечения газов [4];

– введением переменного коэффициента расхода, позволяющего повысить точность вычислений [8];

– соотношениями, позволяющими определить время декомпрессии, представленными в статье В.В. Тарасова [9];

– введением в уравнения для расчета давления массовую подачу от САРД ($G_{рег}$):

$$G_{рег}(j) = k_{проп}\frac{V_{крег}(j)\cdot\left(p - p_k(\mathrm{j})\right)}{R\cdot T_k(j)}, \qquad (1)$$

где V_k – объем кабины, м^3; $p_{рег}$ – заданное давление, Па; p_k – давление в кабине, Па; T_k – температура кабины, °К; R – газовая постоянная воздуха, j = {1, 2, 3, 4}: 1 – атмосфера; 2 – гермокабина; 3 – второй технический отсек; 4 – легкие человека;

– введением второго технического отсека, так как последовательная утечка газа из многосекционного отсека влияет на режим истечения газа и к аппаратуре в техническом отсеке предъявляются повышенные требования по теплозащите;

– введением нового компонента – легких человека.

Основными переменными параметрами, определяющими состояние газовой среды в ограниченном пространстве, являются давление, объем и температура, плотность и влажность. Закон изменения давления в гермокабине имел следующий вид:

$$p_{рег}(j) = p_h + 0{,}5465\cdot\left(p_0 - p_h\right) \qquad (2)$$

Эквивалентная площадь утечки определялась по формуле

$$f_э(j) = k_{расх}(j)\cdot S_у \qquad (3)$$

Температура воздуха в ГК [4]:

$$T_k(j) = T_0\ \left(\frac{p_k(j,1)}{(p_k(j)}\right)^{\frac{1-n}{n}} \qquad (4)$$

ГК современного ЛА в общем случае можно представить в виде нескольких (обычно не более 2–3) сообщающихся секций или отсеков, в каждый из которых через клапан регулятора давления соединен с окружающей средой.

При рассмотрении процесса истечения газов из сосудов неограниченной емкости теорий установлена определенная зависимость между расходом газа, площадью проходного отверстия, параметрами находящегося в кабине газа и параметрами внешней среды.

Величина утечки определяет скорость изменения давления газовой среды в кабине, которая оказывает вполне определенное влияние на жизнедеятельность экипажа ЛА. Для количественной оценки величины утечки необходимо определить режим истечения газа через отверстие.

Чем меньше объем ГК или чем больше размеры отверстия, тем быстрее произойдет декомпрессия. Продолжительность времени, в течение которого газы покинут кабину, при нахождении в пределах атмосферы имеет жизненно важное значение в связи с понижением в кабине парциального давления кислорода, ведущего к развитию гипоксии. В соответствии с этим полное время декомпрессии будет определяться следующей суммой [4]:

$$t_{дек} = t_{закр} + t_{докр}, \qquad (5)$$

где $t_{закр}$ – время закритического истечения; $t_{докр}$ – время докритического истечения.

Время декомпрессии определялось по формулам, представленным в работе [9]. Аналогичную систему уравнений можно составить и для объектов, состоящих из любого числа отсеков.

При построении модели респираторной системы организма за базовую модель была взята модель, представленная в наших предыдущих публикациях [10, 11]. В модели транспорта газов в организме человека были выделены 3 участка: вдыхаемая; выдыхаемая; альвеолярная газовая смесь. Вычислялись напряжения, концентрации, массы газов.

Риск развития высотно-декомпрессионной болезни (ВДБ) определялся по формуле аппроксимирующей кривую безопасного давления экспериментально, определенную В.И. Чадовым [12]:

$$p_{без}^{деком} = -3{,}514\cdot10^{-6}\cdot p_{N_2}^3 + 0{,}005\cdot p_{N_2}^2 - 1{,}624\cdot p_{N_2}^2 + 336{,}7834 \qquad (6)$$

В настоящее время риск возникновения ВДБ оценивается по коэффициенту перенасыщения, являющемуся отношением парциального давления азота до декомпрессии к общему давлению после декомпрессии:

$$K_п = \frac{p_{N_2}^I}{p_{без}^{деком}} \qquad (7)$$

Для земной атмосферы 760 мм рт. ст., $K_п$=1,6.

Переход для анализа декомпрессионной безопасности по кривой В.И. Чадова имеет преимущества, так как он применим для различных типов ЛА – от космических кораблей до воздушных судов, и для различных атмосфер с разными сочетаниями давлений и концентраций.

Безопасная высота определялась из условия:

$$\begin{cases} H_{без} = 44300\cdot\left(1 - \left(\frac{p_{без}^{деком}}{p_0}\right)^{1/5{,}256}\right), \\ \quad при\ p_{без}^{деком} \le 170{,}19; \\ H_{без} = 11000 - 6340\cdot ln\frac{p_{без}^{деком}}{169{,}4}, \\ \quad при\ p_{без}^{деком} \ge 170{,}19 \end{cases} \qquad (8)$$

Методика оценки переносимости декомпрессии человеком

Для решения комплексной задачи: разработки методики оценки переносимости декомпрессии человеком – необходимо решить 3 взаимосвязанные и взаимозависимые подзадачи:

– обосновать уровни переносимости воздействия;

– провести вычислительные эксперименты, имитирующие разгерметизацию гермокабины;

– аппроксимировать полученных зависимостей.

При обосновании уровней переносимости воздействия необходимо учитывать медико-биологические и физиолого-гигиенические ограничения, связанные с использованием существующих средств регулирования параметров давления в ГК в штатных и аварийных ситуациях. На организм человека действуют следующие неблагоприятные факторы, обусловленные воздействием давления в ГК, которое зависит от высоты полета и режима работы САРД [13, 14]:

– гипоксическая гипоксия (легкой, умеренной степени), при высоте от 2500 до 4500 м в штатном полете и выраженной степени при высоте до 12 000 м после разгерметизации;

– гипобария (умеренной и выраженной степени) при высоте в ГК от 6000 м в штатном полете и выраженной степени при высоте до 12 000 м после разгерметизации;

– взрывная декомпрессия (умеренной и выраженной степени) при быстрой разгерметизации ГК при высоте от 4500 до 12 000 м.

– гипотермия (умеренной и выраженной степени) при разгерметизации ГК от -40 до -56 °С.

При анализе этих факторов можно выбрать 3 уровня переносимости, определяющих величину резервного времени необходимого для устранения аварии: предельно переносимый, предельно допустимый и допустимый уровни. Эти три уровня соответствуют высоте 4,5; 6, 12 км.

Целью проведения вычислительных экспериментов был расчет времени декомпрессии, величин утечки газа из кабины и потребной подачи для компенсации этих утечек в зависимости от площади дефекта. Автоматическое регулирование должно обеспечить 4 режима поддержания давления в кабине в аварийных ситуациях:

– полной компенсации дополнительных утечек – величина утечки должна быть равна дополнительной подаче: $p_k = p_{\text{штатной}}$;

– частичной компенсации дополнительных утечек до допустимого уровня: $p_k = p_{4,5\text{ км}}$;

– частичной компенсации дополнительных утечек до предельно допустимой величины: $p_k = p_{6\text{ км}}$;

– частичной компенсации дополнительных утечек до предельно переносимого уровня величины: $p_k = p_{12\text{ км}}$;

– с компенсацией давления, соответствующему безопасному коэффициенту перенасыщения, определяемому по кривой В.И. Чадова.

При имитации разгерметизации ГК на высоте без компенсации (без массовой подачи, компенсирующей падение давления в кабине) рассматривались следующие режимы работы САРД:

– на постоянной высоте с постоянным давлением $p_h = const$;

– на высоте 12 км с давлением $p_h = p_{12}$;

– на высоте 6 км с давлением $p_h = p_6$;

– на высоте 4,5 км с давлением $p_h = p_{4,5}$;

– на безопасной высоте, определяемой по кривой В.И. Чадова.

При моделировании был выбран диаметр отверстия, равный 0,0015 м^2. Имитировалась разгерметизация на высоте 20 км. Полученные результаты были нами аппроксимированы. Зависимость времени декомпрессии от давления разгерметизации имела вид

$$\tau_{\text{дек}} = a \cdot \ln p_{\text{дек}} + b \qquad (9)$$

где
$$\begin{cases} a = -9 \cdot 10^8 \cdot k_{\text{ут}} - 121,85,\ b = 6 \cdot 10^9 \cdot k_{\text{ут}} + 770,59, \\ \quad \text{при } k_{\text{ут}} \le 7,9 \cdot 10^{-9} \\ a = -5 \cdot 10^9 \cdot k_{\text{ут}} - 86,366, b = 3 \cdot 10^{10} \cdot k_{\text{ут}} + 544,05, \\ \quad \text{при } k_{\text{ут}} > 7,9 \cdot 10^{-9} \end{cases}$$

Зависимость массовой подачи от давления регуляции имела вид

$$G_{рег} = a \cdot p_{рег} + b \qquad (10)$$

где
$$a = -47,47 \cdot k_{уТ} + 5 \cdot 10^{(-5)},$$
$$b = 102860 \cdot k_{уТ} - 1,8 \cdot 10^{(-4)}$$

Данные зависимости отображены на рис. 1 и 2.

Исследование проблемы обеспечения безопасности при разгерметизации ГК ЛА было проведено взаимосвязано как с физиологической, так и технической точки зрения, что дало возможность исследовать различные режимы функционирования САРД. Процесс истечения воздуха из ГК ЛА при разгерметизации был изучен с позиций теории термодинамики тела переменной массы при возрастающем внешнем противодавлении, т.е. в условиях экстренного снижения на безопасную высоту. Полученные результаты позволили количественно определить степень безопасности и выявить возможности обеспечения безопасности при снижении ЛА с разных высот. Существенным результатом работы является разработка и обоснование комплексной имитационной модели газодинамических процессов при декомпрессии секционированных

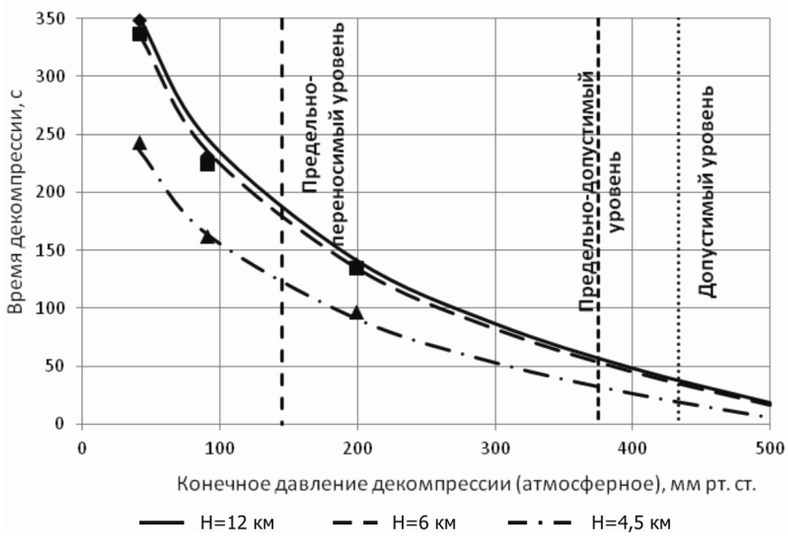


Рис. 1. Время декомпрессии при разгерметизации ГК при снижении на разные высоты

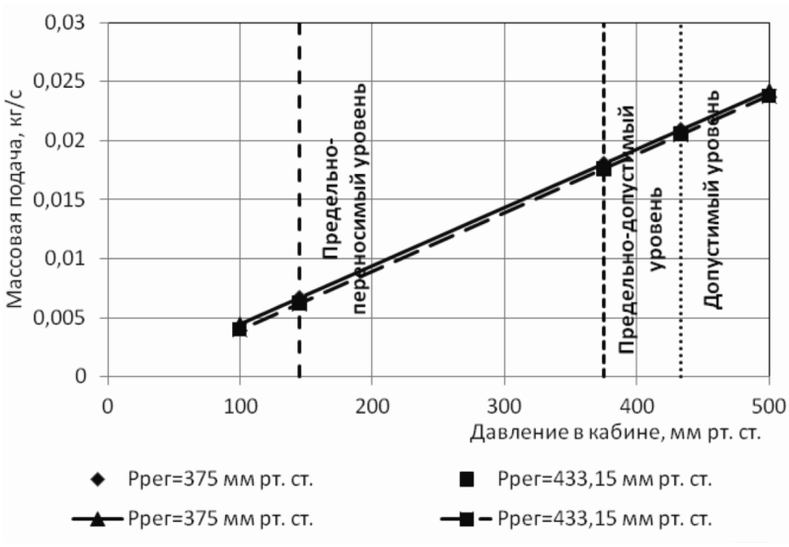


Рис. 2. Величина массовой подачи при разгерметизации ГК на разных режимах работы САРД

ГК ЛА, которая может использоваться в качестве универсального математического инструмента при решении широкого круга практических задач, связанных с нарушением герметичности, регулированием параметров воздуха, наддувом и вентиляцией ГК.

Универсальность разработанной математической модели позволяет использовать ее также для решения самых разнообразных задач, возникающих при проектировании сложных систем наддува и вентиляции оборудования ЛА, сообщающихся газовых емкостей при наличии притока и/или оттока газа, систем кондиционирования и вентиляции промышленных объектов, подводных кораблей, подземных сооружений, убежищ и т.п.

Полученная модель позволяет на стадии проектирования ЛА произвести рациональный выбор герметических и газодинамических параметров ГК, а также летно-эксплуатационных характеристик ЛА с учетом возможной декомпрессии кабины в полете или, наоборот, при заданных параметрах ГК и летных данных оценить степень опасности при разгерметизации и заранее предусмотреть комплекс средств по обеспечению безопасности.

Выводы

1. Построенная на основе базовой модели В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина имитационная модель разгерметизации кабины позволяет проводить теоретические расчеты и определять взаимозависимость параметров САРД на критических режимах работы с учетом физиологических показателей человека.

2. Значения параметров, полученные в вычислительных экспериментах, позволяют применить модель для дальнейших исследований по обоснованию медико-технических требований к программам регулирования давления в ГК ВС на критических режимах работы.

3. Полученные в результате анализа расчетных данных регрессионные зависимости позволяют определить время декомпрессии и величину массовой подачи для различных режимов работы САРД с учетом уровней переносимости воздействия на организм человека.

4. Представленный алгоритм расчета позволяет количественно учесть эффект увеличения продолжительности допустимого времени пребывания экипажа в условиях понижающегося давления в ГК в процессе декомпрессии в зависимости от высоты разгерметизации и допустимой скорости экстренного снижения на безопасную высоту.

Список литературы

1. *Коэнчи Е.Б.* Декомпрессионные явления на искусственных спутниках с живыми существами на борту. // Человек в условиях высотного космического полета: Сб. переводов из иностранной периодической литературы / В.И. Иванов, ред. М., 1960. С. 349–416.

Koenchi E.B. Decompression phenomena on artificial satellites with living beings on board // Man under conditions of high altitude space flight: Collection of translations from foreign periodic literature / V.I. Ivanov, ed. Moscow, 1960. P. 349–416.

2. *Матюшев Т.В., Дворников М.В., Петров М.А., Носков Р.Г.* Теоретический анализ режимов декомпрессии гермокабины летательного аппарата при разгерметизации // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: В 4 т. М., 2021. С. 165–169.

Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Petrov M.A., Noskov R.G. Theoretical analysis of decompression modes of the flight vehicle hermetic cabin during depressurization // XLV Academic readings on cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists – pioneers of space exploration: In 4 v. Moscow, 2021. P. 165–169.

3. *Ивлентиев В.С.* Разгерметизация кабин летательных аппаратов: Дис. … д-ра техн. наук. М., 1983.

Ivlentiev V.S. Depressurization of aircraft cockpits: Dissertatsiya … doktora technicheskikh nauk. Moscow, 1983.

4. *Илюшин Ю.С., Олизаров В.В.* Системы обеспечения жизнедеятельности и спасения экипажей летательных аппаратов. М., 1972.

Ilyushin Y.S., Olyzarov V.V. Systems of life support and rescue of aircraft crews. Moscow, 1972.

5. *Акопов М.Г., Бекасов В.И., Долгушев В.Г.* Системы оборудования летательных аппаратов. 3-е изд., испр. и доп. / А.М. Матвеенко, В.И. Бекасов, ред. М., 2005.

Akopov M.G., Bekasov V.I., Dolgushev V.G. Aircraft equipment systems. 3rd ed. / A.M. Matveenko, V.I. Bekasov, eds. Moscow, 2005.

6. *Быков Л.Т., Егоров М.С., Тарасов П.В.* Высотное оборудование самолетов. М., 1958.

Bykov L.T., Egorov M.S., Tarasov P.V. High altitude equipment of aircraft. Moscow, 1958.

7. *Быков Л.Т., Ивлентиев В.С., Кузнецов В.И.* Высотное оборудование пассажирских самолетов. М., 1972.

Bykov L.T., Ivlentiev V.S., Kuznetsov V.I. High-altitude equipment of passenger aircraft. Moscow, 1972.

8. *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. М., 1961.

Deitsch M.E. Technical gas dynamics. Moscow, 1961.

9. *Тарасов В.В.* Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе // Вестник Тюмен. гос. уни-тета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 2. С. 84–95.

Tarasov V.V. Calculation of ideal gas flow time from a constant volume tank into a constant pressure medium during adiabatic process // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika. 2016. V. 2. № 2. P. 84–95.

10. *Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Ryzhenkov S.P., Petrov M.A.* Analysis of the body gas exchange indicators in high-altitude flight on the basis of the static model of the respiratory system // AIP Conference Proceedings 2318, 160005 (AIP Conference Proceedings, 2021). DOI: 10.1063/5.0036005.

11. *Матюшев Т.В., Дворников М.В., Петров М.А.* Моделирование респираторных реакций организма человека при имитации падения барометрического давления в гермообъеме // Пилотируемые полеты в космос. 2021. № 1 (38)/2021 С. 89–106. DOI: 10.34131/MSF.21.1.89-106.

Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Petrov M.A. Simulation of respiratory reactions of the human body during simulation of barometric pressure drop in a pressurized volume // Pilotiruemye polety v kosmos. 2021. № 1 (38)/2021 P. 89–106. DOI: 10.34131/MSF.21.1.89-106.

12. *Чадов В.И.* Экспериментально-теоретическое обоснование декомпрессионной безопасности внекорабельной деятельности экипажей пилотируемых космических объектов: Автореф. дис. … д-ра мед. наук. М., 2005.

Chadov V.I. Experimental-theoretical justification of decompression safety of extravehicular activity of crews of manned space objects: Avtoreferat dissertatsii … doktora meditsinskikh nauk. Moscow, 2005.

13. *Малкин В.Б.* Барометрическое давление. Газовый состав // Основы космической биологии и медицины. Т. II, Кн. 1 Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. М., 1975.

Malkin V.B. Barometric pressure. Gas composition // Basics of space biology and medicine. V. II. Book 1. Ecological and physiological foundations of space biology and medicine. Moscow, 1975.

14. Авиационная медицина: Руководство / И.М. Рудный, П.В. Васильев, С.А. Гозулов, ред. М., 1986.

Aviation medicine: a Manual / I.M. Rudny, P.V. Vasiliev, S.A. Gozulov, eds. Moscow, 1986.

Поступила 25.02.2022

THEORETICAL EVALUATION OF THE HUMAN DECOMPRESSION TOLERANCE INSIDE A PRESSERIZED HERMETIC CABIN

Matyushev T.V.[1], Dvornikov M.V.[1], Ryzhenkov S.P.[1], Maximova I.D.[2], Rybina A.S.[2], Malyshev A.D.[2], Noskov R.G.[3]

[1]Research and Test Center (Aerospace Medicine and Military Ergonomics) of the Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University)
[3]Semenov Federal Research Center of Chemical Physics, Moscow

The paper presents an approach to evaluating decompression tolerance with the use of a model of gas dynamics in a partitioned aircraft cabin after loss of pressure.

The model takes in decompression effects on a pilot as a function of flight parameters, cabin interior structures and mode of the pressurization system operation. Mathematical simulation of decompression due to loss of cabin pressure made it possible to define time of decompression, pressure differential between compartments, amount of oxygen to be supplied, and safe altitude.

The model can be instrumental to aircraft cabin designers in making a rational choice of pressurization and gas dynamics characteristics, as well as performance abilities in the event of loss of cabin pressure or evaluate risk level in specific cases to consider safety provisions.

Key words: depressurization, flow coefficient, decompression, stratosphere, simulator, physiological factors, altitude-decompression illness, hypoxia, barotrauma.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 90–97.

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ГЕНИНА АБРАМА МОИСЕЕВИЧА

Баранов В.М., Белаковский М.С.

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

E-mail: info@imbp.ru

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56. № 2. С. 98–102.

12 мая 2022 г. исполняется 100 лет со дня рождения Абрама Моисеевича Генина – одного из основоположников космической биологии и медицины.

Абрам Моисеевич родился в г. Климовичи Белорусской ССР. Окончив в 1943 г. военный факультет при 2-м Московском медицинском институте, он получил боевое крещение в огне Великой Отечественной войны. Будучи старшим врачом авиационного штурмового полка, А.М. Генин не только выполнял свои основные обязанности, но и неоднократно вылетал, проявляя личную смелость, на боевые задания в качестве воздушного стрелка.

В послевоенные годы А.М. Генин окончил адъюнктуру на кафедре авиационной медицины Центрального института усовершенствования врачей и продолжил свою научно-преподавательскую деятельность на кафедре боевой подготовки Военно-воздушной академии. Его внимание было привлечено к решению актуальных для авиации того времени вопросов физиологии гипоксических состояний и проблем декомпрессионной болезни у летчиков, чему и была посвящена его кандидатская диссертация.

В 1956 г. Абрам Моисеевич перешел в Институт авиационной и космической медицины, где в этот период развертывались первые экспериментальные исследования по космической биологии и медицине. Он был назначен ответственным исполнителем работ по подготовке и проведению полетов животных при вертикальных запусках ракет Р-2 и Р-5 на высоты 210–450 км, принимал участие в подготовке полета Второго искусственного спутника Земли с собакой Лайкой (03.11.1957). Результаты этих биологических исследований были использованы при проведении пилотируемых космических полетов. При непосредственном участии А.М. Генина разрабатывались первые системы регенерации воздуха, питания, водообеспечения, защиты организма от высоких температур, спасения в случае разгерметизации обитаемой кабины космического корабля и других аварийных ситуациях. Эти работы способствовали успешному осуществлению запуска космического корабля «Восток» с первым космонавтом на борту Ю.А. Гагариным (12.04.1961). А.М. Генин был непосредственным участником подготовки и проведения этого исторического полета.

Стремясь самому испытать воздействие космического полета и найти при этом наиболее эффективные решения медико-биологических проблем человека, Абрам Моисеевич дважды обращался к командованию с рапортами, в которых просил зачислить его в кандидаты для полета в верхние слои атмосферы (1956) и на искусственном спутнике Земли (1960). Возглавив отдел систем жизнеобеспечения, он организовал проведение цикла исследований по обоснованию оптимального газового состава искусственной атмосферы космических кораблей и разработке систем регенерации и кондиционирования воздуха для обитаемых отсеков. Этими работами были заложены основы гигиенического направления в космической медицине.

Старший врач авиационного штурмового полка А.М. Генин (слева). Венгрия, 1944 г.

А.М. Генин (крайний справа) с коллегами (Е.М. Югановым, А.Д. Серяпиным и И.И. Касьяном), подавшими, как и он, рапорты начальству с просьбой о включении в число кандидатов для полетов на ракетах в верхние слои атмосферы. Москва, 1956 г.

Приземление головной части ракеты Р-2 с животными. Сотрудники: Б.В. Блинов и А.М. Генин (справа) на полигоне Капустин Яр, 1957 г.

Организаторы и руководители гипербарического направления в ИМБП. Верхний ряд: О.Г. Газенко, П.М. Граменицкий, А.Г. Дианов, А.М. Генин. Нижний ряд: В.М. Баранов, Б.Н. Павлов, И.П. Полещук

Окончание гипербарического эксперимента с кислородно-неоновой атмосферой. Геленжик, 1986 г.

В начале 1960-х годов под руководством А.М. Генина успешно начались исследования по созданию перспективных систем регенерации газовой среды герметических объектов, основанных на физико-химических и биологических принципах, и изысканию оптимального газового состава атмосферы. Уже тогда Абрам Моисеевич выдвинул гипотезу о возможности управлять функциональным состоянием человека в космическом полете, изменяя газовый состав атмосферы пилотируемого объекта. В последующие годы эта идея «динамической атмосферы» была развита его учениками и последователями.

После первых пилотируемых космических полетов стало понятно, что дальнейшее увеличение продолжительности пребывания человека в космическом пространстве и тем более его освоение невозможны без решения малоисследованных проблем, связанных с защитой космонавтов от длительного воздействия на организм неблагоприятных факторов. Поэтому начиная с 1965 г. научная деятельность Абрама Моисеевича была направлена на изучение медико-биологических проблем, связанных с подготовкой к длительным полетам на орбитальных пилотируемых станциях. Решение новых задач, возникавших при разработке первых программ многосуточных космических полетов, так или иначе связано с именем профессора А.М. Генина. Под его научным руководством была сформулирована возможность длительных полетов человека на орбитальных пилотируемых станциях. Помимо общегигиенических вопросов в его научной деятельности на первое место выдвигается решение малоисследованных проблем, связанных с защитой космонавтов от длительного воздействия на организм неблагоприятных факторов космического полета.

По инициативе и под руководством А.М. Генина в 1968 г. был успешно проведен один из первых в мировой практике 70-суточный наземный эксперимент с испытателями, моделирующий воздействие ряда факторов космического полета. На основании результатов этого эксперимента, а также данных, полученных ранее в других научных исследованиях, была определена стратегия медико-биологического обеспечения длительных орбитальных космических полетов.

После 18-суточного (для того времени рекордного) полета космического корабля «Союз-9» (1970), когда состояние вернувшегося экипажа медики оценили как неудовлетворительное, а особенно после трагической гибели членов первой экспедиции на орбитальную станцию «Салют» (1971) появилось мнение о невозможности длительного пребывания человека в космосе. Во многом благодаря принципиальной позиции, занятой А.М. Гениным, опирающегося на полученные научные знания, орбитальные пилотируемые полеты были продолжены с нарастающей длительностью.

В 1975 г., перейдя в Институт медико-биологических проблем Министерства здравоохранения СССР, Абрам Моисеевич продолжал работу по руководству крупными космическими проектами (пилотируемые полеты на орбитальной пилотируемой станции, исследования на биоспутниках, медико-техническое сопровождение разработки космического корабля многоразового использования «Буран»). Научное предвидение А.М. Генина основывалось на энциклопедических знаниях, глубоких аналитических способностях, любознательности ученого и новаторской смелости. Совместная работа с ним создавала ощущение научной основательности этого человека, формировала понятие «школы» ученого и отношения «учитель-ученик», независимо от опыта и положения ученика. Неотъемлемыми человеческими качествами Абрама Моисеевича Генина были доброжелательность, тактичность и мудрость. Он умел работать с людьми и это было важнейшей составляющей частью его организаторского таланта.

В 1984 г. наряду с продолжением своих исследований по проблемам космической медицины А.М. Генин организует цикл научно-исследовательских работ в области гипербарической физиологии и водолазной медицины. В 1985 г. коллективом, возглавляемым А.М. Гениным и И.П. Полещуком, на базе барокомплекса Института океанологии АН СССР было осуществлено погружение на глубину 450 м с использованием кислородно-неоновой смеси. В этих исследованиях впервые практически было доказано, что неон при таких давлениях не вызывает наркоза, а его высокая плотность, соответствующая плотности гелиевой среды на глубине 2000 м не препятствует жизнедеятельности и выполнению легкого физического труда.

Продолжая эту линию научных поисков, в 1986 г. А.М. Генин руководит уникальным экспериментом, направленным на выяснение значения плотности газовой среды в ограничении глубины погружения у водолазов, на которой возможна эффективная работа. Проведенные исследования впервые доказали, что плотность газовой среды не является препятствием в достижении человеком больших глубин, во много раз превышающих ранее прогнозируемые пределы.

В ряду исследований по обеспечению медицинской безопасности процесса погружений водолазов и акванавтов особое место занимают эксперименты, выполненные Б.Н. Павловым, С.Е. Плаксиным и Ю.Ф. Никитиным в 1991 г. на крысах, находящихся в кислородно-азотно-гелиево-водородной среде под давлением до 1900 м вод. ст. При этом у животных не были отмечены угрожающие жизни признаки нервного синдрома высоких давлений.

С момента создания в Институте медико-биологических проблем комиссии по биомедицинской этике и до конца своей жизни А.М. Генин возглавлял

ее. Деятельность комиссии была посвящена чрезвычайно важной проблеме оценки соблюдения правовых, этических и гуманитарных норм при проведении физиолого-гигиенических и психофизиологических исследований с участием человека, а также экспериментов на животных.

Абрам Моисеевич Генин ушел из жизни 07.06.1999 г. Перу Абрама Моисеевича Генина принадлежат более 200 научных трудов. Он являлся редактором ряда крупных изданий, посвященных вопросам авиакосмической медицины, биологии, проблемам гипербарии, включая российско-американские: «Основы космической биологии и медицины» (том 3, 1975 г.), «Космическая биология и медицина (том 2, 1994 г.). Созданная им научная школа представлена большим коллективом учеников и последователей, среди которых более 20 кандидатов и докторов наук.

За разработку средств профилактики неблагоприятного влияния невесомости А.М. Генин удостоен Государственной премии СССР. Он награжден орденом Красной Звезды, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Отечественной войны II степени и многочисленными медалями.

Бескорыстная преданность науке, исключительная широта научных интересов и высокая работоспособность сделали профессора А.М. Генина ведущим ученым в области авиакосмической и гипербарической медицины. Своими фундаментальными научными исследованиями в этой области он приобрел широкую известность как у нас в стране, так и за рубежом.

Профессор А.М. Генин, безусловно, относится к той плеяде ученых, кого мы сегодня можем назвать отцами-основателями космической биологии и медицины в нашей стране.

100TH BIRTHDAY OF GENIN ABRAM MOISEEVICH

Baranov V.M., Belakovsky M.S.

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

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2022. V. 56. № 2. P. 98–102.

ПАМЯТИ СТРЕЛЬЦОВА ВЛАДИМИРА ВЛАДИМИРОВИЧА – ОДНОГО ИЗ ОСНОВОПОЛОЖНИКОВ АВИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ

26 июня 2022 г. исполняется 120 лет со дня рождения профессора В.В. Стрельцова. Врач-физиолог, ученик академика Л.А. Орбели – он один из основоположников авиационной медицины в России.

Профессор В.В. Стрельцов активно участвовал в организации Института авиационной медицины в 1935 г., был первым заведующим кафедрой авиационной медицины при Центральном институте усовершенствования врачей в Москве, руководил секцией авиационной и космической медицины в Московском физиологическом обществе. Его деятельность сыграла важную роль в создании базы для развития космической медицины в нашей стране.

В.В. Стрельцов опубликовал свыше 100 научных работ по авиационной медицине, в том числе монографию «Авиационная физиология и медицина в СССР за 25 лет» (1942), первым в СССР совершил экспериментальный подъем в барокамере и первым из врачей провел ознакомительный прыжок с парашютом. В последние годы занимался физиолого-гигиеническим обоснованием систем жизнеобеспечения при высотных полетах, вопросами кислородного голодания организма, работал над методическими основами профессионального отбора в авиации и врачебно-летной экспертизы.

Награжден орденом Ленина, орденом Красного Знамени, медалями.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами сотрудников ГНЦ РФ – ИМБП РАН:

Евченко Марину Вячеславовну

Медникова Александра Викторовича

Молочкову Нину Николаевну

Сталоверова Юрия Евгеньевича

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!