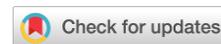


В.В. Нероев¹, М.В. Зуева¹, И.В. Цапенко¹,
Ю.А. Бубеев², О.М. Манько², А.Е. Смолевский²,
А.М. Алескеров², М.А. Грачева³



¹ Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца,
Москва, Российская Федерация

² Институт медико-биологических проблем, Москва, Российская Федерация

³ Институт проблем передачи информации РАН им. А.А. Харкевича, Москва, Российская Федерация

Функциональная активность сетчатки и зрительные вызванные корковые потенциалы при моделировании факторов космического полета в условиях четырёхмесячной изоляции в гермообъекте с искусственной средой обитания

488

Обоснование. Искусственная среда замкнутого пространства вызывает снижение функционального резерва центральной нервной системы и может влиять на здоровье человека и успешность космических миссий. В решении этой проблемы одной из актуальных задач является изучение механизмов адаптации, приспособляющих функционирование зрительной сенсорной системы к условиям действия факторов экстремальной среды. **Цель исследования** — получить новые объективные данные о закономерностях изменения функциональной активности зрительной системы при длительном нахождении человека в экстремальных условиях среды обитания. **Методы.** До и после 4-месячного изоляционного эксперимента с имитацией полета на Луну проводили электрофизиологическое исследование шести практически здоровых членов экипажа с регистрацией комплекса электроретинограмм (ЭРГ) и зрительных вызванных корковых потенциалов (ЗВП) на реверсивный паттерн по международным стандартам ISCEV. В динамике на борту оценивали скорректированную монокулярную остроту зрения (МОЗ). **Результаты.** После окончания эксперимента в среднем по группе отсутствовали статистически значимые изменения МОЗ и функциональной активности сетчатки и зрительной коры по сравнению с исходными данными. Однако были выявлены индивидуальные изменения со стороны ритмической ЭРГ и редукция ЗВП на мелкие паттерны, стимулирующие парвоцеллюлярный канал зрительной системы, у трех испытуемых. Отмеченные изменения ассоциированы с более высоким зрительно напряженным трудом и физической активностью этих членов экипажа и с индивидуальной реакцией на депривацию сна у пилотов, наделенных повышенной ответственностью. **Заключение.** Четырёхмесячная изоляция с имитацией космической миссии не вызвала значимых изменений функциональной активности сетчатки и зрительных путей у здоровых членов экипажа. Выявлены индивидуальные различия ЗВП ответов парвоцеллюлярной зрительной системы, которые могут отражать высокий уровень психофизиологической адаптации и стрессоустойчивости у физически активных членов экипажа.

Ключевые слова: изоляция, космические полеты, электроретинография, зрительные вызванные потенциалы, адаптация, экстремальные условия

Для цитирования: Нероев В.В., Зуева М.В., Цапенко И.В., Бубеев Ю.А., Манько О.М., Смолевский А.Е., Алескеров А.М., Грачева М.А. Функциональная активность сетчатки и зрительные вызванные корковые потенциалы при моделировании факторов космического полета в условиях четырёхмесячной изоляции в гермообъекте с искусственной средой обитания. *Вестник РАМН.* 2021;76(5):488–496. doi: <https://doi.org/10.15690/vramn1323>

Обоснование

Успешность космических миссий при длительных полетах за пределы низкой околоземной орбиты зависит от преодоления многих проблем и связана не только с новыми техническими достижениями, но и с возможностью прогнозирования поведения и производительности человека в сложной среде обитания. В настоящее время существует значительный пробел в понимании факторов, влияющих на адаптационные возможности человека, его поведение и в итоге — на успех всей миссии [1]. Наиболее ценные знания о факторах, от которых зависят производительность и здоровье членов экипажа, могут быть получены при проведении исследований непосредственно в процессе космических полетов, однако возможности

таких исследований на борту космических станций крайне ограничены временными и техническими рамками. Учитывая это, бесценным является опыт человека, полученный на Земле в условиях, приближенных или имитирующих условия космических полетов.

Несмотря на то что лабораторные исследования не связаны тесно с реальной средой, с которой сталкивается человек в космосе, наземные исследования представляют полезную информацию о динамике физиологических и психофизиологических функций у членов экипажей до и после полетов или до и после нахождения человека в специфических условиях на Земле. Наиболее ценны результаты исследований, проведенных непосредственно во время выполнения наземных экспериментов. Полагают, что наземные экспедиции с длительной естествен-

ной изоляцией участников миссий, такие как пещерные [1] и антарктические экспедиции [2], и другие условия экспериментов предлагают уникальные возможности для исследований. Они разделяют некоторые физические и психологические проблемы космического полета [3] и способствуют получению новых знаний об адаптационных возможностях человека и повышению производительности и безопасности его работы в экстремальных условиях как на Земле, так и в космосе. В частности, исследования полярных экспедиций выявили у участников арктических миссий симптомы, схожие с теми, которые испытывает экипаж в космосе, например нарушение сна, снижение когнитивных функций, напряжение в межличностных отношениях и конфликты [4, 5].

Хроническая социальная изоляция оказывает негативное влияние на психическое здоровье человека, например, ее часто связывают с депрессией и посттравматическим стрессовым расстройством (цит. по: [6]). Одиночество или ограниченное социальное общение может нанести вред как психическому, так и физическому здоровью. В социальной изоляции люди менее способны справляться со стрессовыми ситуациями и чаще испытывают депрессию. Они могут иметь проблемы с обработкой информации, что, в свою очередь, может явиться причиной трудностей с принятием решений, хранением информации и извлечением ее из памяти. Воздействие социальной изоляции усиливается, когда люди помещаются в физически изолированную среду, которая индуцирует негативные психологические последствия, включая значительное повышение тревожности и снижение способ-

ности мыслить ясно, что может рассматриваться как следствие сниженной сенсорной стимуляции мозга [6].

Известно, что искусственная среда замкнутого пространства, длительная адинамия, эмоциональная напряженность и монотонность труда вызывают снижение функционального резерва центральной нервной системы (ЦНС) человека-оператора. Одна из важных задач офтальмоэргономики экстремальной среды — изучение механизмов адаптации, приспособляющих функционирование зрительной сенсорной системы к условиям действия неблагоприятных факторов [7]. Сохранность функциональной активности сенсорных систем предполагает высокую стрессоустойчивость. Нами в условиях эксперимента с изоляцией в течение 4 мес (SIRIUS18/19) проведено комплексное электрофизиологическое исследование зрительной системы, направленное на расширение представлений об устойчивости зрительных функций в экстремальных ситуациях, для определения критериев ее оценки и возможности прогнозирования ухудшения.

Цель данной работы — получение новых объективных данных о закономерностях изменения функциональной активности зрительной системы при длительном нахождении человека в экстремальных условиях среды обитания.

Методы

489

Дизайн исследования

Эксперимент по 4-месячной изоляции в гермообъекте выполнялся на базе ФГБУН «Государственный научный

V.V. Neroev¹, M.V. Zueva¹, I.V. Tsapenko¹, Yu.A. Bubeev², O.M. Manko²,
A.E. Smoleevskiy², A.M. Aleskerov², M.A. Gracheva³

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, Moscow, Russian Federation

² State Scientific Center of the Russian Federation — Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russian Federation

³ Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), Moscow, Russian Federation

Functional Activity of the Retina and Visual Evoked Cortical Potentials in Simulation the Factors of Space Flight in Conditions of Four Month Isolation in a Hermetic Object with Artificial Habitat

Background. The artificial environment of confined space causes a decrease in the functional reserve of the central nervous system and can affect human health and the success of space missions. In solving this problem, the urgent task is to study adaptation mechanisms that adapt the functioning of the visual sensory system to the conditions of the extreme environment. **Purpose** — to obtain new objective data on the alterations in the functional activity of the visual system during prolonged stay of a person in extreme environmental conditions. **Methods.** Before and after a 4-month isolation experiment simulating a flight to the moon, an electrophysiological study was conducted of six practically healthy crew members with registration of a set of electroretinograms (ERG) and pattern-reversal visual evoked cortical potentials (VEP) according to the ISCEV standards. In dynamics, corrected monocular visual acuity (MVA) was assessed on board. **Results.** After the end of the experiment, on average for the group, there were no statistically significant changes in the MVA and functional activity of the retina and visual cortex compared with the initial data. However, individual changes on the part of the flicker ERG and reduction of VEP to small patterns stimulating the parvocellular channel of the visual system were revealed in three testers. These changes were associated with higher visually intense work and physical activity of these crew members, and with an individual reaction to sleep deprivation of pilots with increased responsibility. **Conclusion.** Four-month isolation with imitation of a space mission did not cause significant changes in the functional activity of the retina and visual pathways in healthy crew members. Individual differences of VEP-responses of the parvocellular visual system were revealed, which can reflect a high level of psychophysiological adaptation and stress resistance in physically active crew members.

Keywords: isolation, space flights, electroretinography, visual evoked potentials, adaptation, extreme environments

For citation: Neroev VV, Zueva MV, Tsapenko IV, Bubeev YuA, Manko OM, Smoleevskiy AE, Aleskerov AM, Gracheva MA. Functional Activity of the Retina and Visual Evoked Cortical Potentials in Simulation the Factors of Space Flight in Conditions of Four Month Isolation in a Hermetic Object with Artificial Habitat. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences.* 2021;76(5):488–496. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/vramn1323>

центр РФ — Институт медико-биологических проблем РАН» (ГНЦ РФ — ИМБП РАН) в 2019 г. в рамках базовой темы РАН № 63.2 «Исследование интегративных процессов в центральной нервной системе, закономерностей поведения и деятельности человека в условиях автономности и под влиянием других экстремальных факторов среды». Исследование проводилось на выборке, состоящей из 6 добровольцев (3 мужчин и 3 женщин). Добровольцы в течение 4 мес находились в герметично замкнутом объекте с контролируруемыми параметрами среды обитания, которые соответствовали ГОСТ Р50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования». В эксперименте использовалось динамическое светодиодное освещение. Во время изоляции коррелированная цветовая температура освещения плавно изменялась в диапазоне от 2700 до 6500 К. Уровень освещенности в течение суток изменялся от 200 до 800 лк. Не менее 2/3 светлого времени суток в гермообъекте приходилось на режим освещения с коррелированной цветовой температурой 4000–5000 К и уровнем освещенности 400–500 лк.

Электрофизиологические исследования зрительной системы выполнялись до и после 4-месячной изоляции в гермообъекте на базе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России (НМИЦ ГБ им. Гельмгольца).

Критерии соответствия

Критериями включения добровольцев в исследование являлись: возраст от 27 до 50 лет, наличие высшего образования, отсутствие психических расстройств, высокая психологическая устойчивость и психологическая совместимость с другими участниками исследования, отсутствие соматических заболеваний (острых и хронических в стадии обострения), отсутствие вредных привычек (для исключения симптомов абстиненции в условиях изоляции). Также критериями включения было: отсутствие аномалий цветового зрения, значимых нарушений рефракции, офтальмопатологии нейродегенеративного, сосудистого или иного характера.

Решение о включении добровольца в исследование принималось коллегиально на основании заключения врачебно-экспертной комиссии и результатов психологического отбора.

Исключение добровольца из исследования проводилось по его первому требованию, а также по медицинским показаниям к прекращению его участия в исследовании (травмы, острые или обострение хронических заболеваний).

Условия проведения

Четырехмесячная изоляция проводилась в Медико-техническом комплексе (МТК) на базе ГНЦ РФ — ИМБП РАН.

Корректируемая монокулярная острота зрения проводилась у экипажа на борту гермообъекта и оценивалась на базе ИППИ РАН им. А.А. Харкевича.

Объективные электрофизиологические исследования функциональной активности зрительной системы до и после изоляции выполнялись в отделе клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» Минздрава России.

Продолжительность исследования

Продолжительность изоляционного эксперимента составляла 4 мес. ЭФИ выполняли в период за 1–2 нед

до начала эксперимента и в течение 2 нед после завершения изоляции и выхода экипажа из гермообъекта, имитирующего космическую станцию. МОЗ оценивали до, во время (через каждые 2 нед) и после изоляции.

Описание медицинского вмешательства

Медицинские вмешательства во время проведения эксперимента не производились. Из факторов немедицинской природы имелось несколько эпизодов депривации сна. Их продолжительность составляла до 30 ч, а частота не превышала 1 раза в месяц. Интервал между самым поздним эпизодом депривации сна и проведением заключительного электрофизиологического исследования составил 5 нед.

Исходы исследования

Изменение амплитудных или временных параметров фотопических и скотопических электроретинограмм (ЭРГ), паттерн-ЭРГ и зрительных вызванных корковых потенциалов (ЗВП) анализ которых использован для выявления селективных изменений функциональной активности фоторецепторов, биполярных и ганглиозных клеток сетчатки и зрительной коры при длительной изоляции, изменения динамики скорректированной монокулярной остроты зрения.

Анализ в подгруппах

Индивидуальные особенности изменений ЭРГ и ЗВП (без формирования подгрупп) оценивали с учетом различий в обязанностях и относительном уровне ответственности (рядовые члены экипажа, командир и бортиженер), физической нагрузки (регулярные и нерегулярные физические тренировки) и эмоционального напряжения. Значения скорректированной монокулярной остроты зрения оценивали в сравнении с результатами контрольной группы.

Методы регистрации исходов

Остроту зрения оценивали с помощью интерактивной компьютерной программы «Интерактивная программа для оценки остроты зрения на основе точного измерения порогов с использованием трех опто типов “Тип-Топ”» (разработчик — ИППИ РАН им. А.А. Харкевича). В компьютерной программе «Тип-Топ» используются модифицированные трехполосные стимулы, представляющие собой пару черно-белых решеток с тремя горизонтальными и тремя вертикальными полосами равной ширины. Яркость экрана составляет 167 кд/м². При исследовании остроты зрения обязательным требованием было соблюдение освещенности помещения, равной 258 лк (85 кд/м²), что соответствует международным стандартам ANSI (American National Standards Institute).

Стимулы на экране монитора предъявлялись на расстоянии 0,5; 1,0 и 4,0 м от глаза. Для автоматической регистрации ответов испытуемых использовали планшет, на котором отображался набор предъявляемых опто типов. В дни обследования скорректированной монокулярной остроты зрения (до, во время и после изоляции) ее оценка проводилась дважды в одни и те же периоды времени: утром — с 8:00 до 9:00 ч и вечером — с 18:00 до 19:00 ч.

Электрофизиологические исследования выполняли в экранированной от электромагнитных наводок кабине с помощью диагностической системы RETPort/scan21 (Roland Consult, Германия). Методика исследований и ус-

ловия регистрации потенциалов соответствуют требованиям, предусмотренным стандартами ISCEV (Международного общества клинической электрофизиологии зрения). Регистрировали стандартную колбочковую ЭРГ на диффузные ганцфельд-вспышки [8], фотопические ритмические ЭРГ в широком спектре частот от 8 до 30 Гц [9], ЭРГ на реверсирующие паттерны (паттерн-ЭРГ) [10], а также ЗВП на паттерн-стимуляцию [11].

Оценивали амплитудные и временные параметры биопотенциалов, а также выполняли расчет ретинокортикального времени, индексов (отношений амплитуд) волн b/a колбочковой ЭРГ, глиального индекса K_r (b/P ЭРГ) и пиков $P50/N95$ паттерн-ЭРГ. Паттерн-ЭРГ и ЗВП регистрировали на черно-белые шахматные паттерны с частотой 4 реверса в секунду (2 Гц), контрастом 97%. Паттерн-ЭРГ записывали на стимулы с угловым размером ячеек 16° ; $0,8^\circ$ и $0,3^\circ$. ЗВП регистрировали на паттерны с угловым размером ячеек 1° и $0,3^\circ$.

Все исследования проводили в одно и то же время суток (с 10:00 ч до 12:00 ч утра), чтобы минимизировать циркадные влияния на функциональные показатели зрительной системы.

Результаты электрофизиологических исследований, выполненных до и после гермокамерного эксперимента, представлены в табл. 1–4. В базовых исследованиях, проведенных до изоляционного эксперимента, абсолютные значения всех параметров ЭРГ и ЗВП у членов экипажа соответствовали среднестатистической норме. Однако, учитывая высокую внутригрупповую вариабельность данных, для определения тенденции изменений после эксперимента мы оценивали также индивидуальную динамику показателей у каждого испытуемого, а средние по группе значения (и среднее квадратическое отклонение) были определены только для амплитуды волн биопотенциалов.

Этическая экспертиза

Программа данных экспериментальных исследований с участием человека по уровню научной обоснованности, достаточности мероприятий по организации медицинского контроля и обеспечению безопасности испытуемых добровольцев была признана соответствующей нормам биомедицинской этики и одобрена комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ — ИМБП РАН (физиологическая секция Российского комитета по биоэтике при комиссии РФ по делам ЮНЕСКО, протокол № 501 от 18 февраля 2019 г.).

Статистический анализ

Размер выборки предварительно не рассчитывался. Исследования выполняли у отобранных медицинской комиссией членов международного экипажа (добровольцев), утвержденного для эксперимента, имитирующего некоторые аспекты полета на Луну.

Статистический анализ проводили при помощи пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2011 для ОС Windows, а также статистического пакета

STATISTICA 10.0 (Stat Soft Inc., США). Средние по группе значения амплитуд представлены в виде $M \pm SD$, где M — среднее арифметическое, а SD — среднее квадратическое отклонение. Для сравнения исследуемых выборок использовали t -критерий Стьюдента. Различия считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты

Объекты (участники) исследования

Исследование проводилось на связанных выборках, состоящих из 6 практически здоровых добровольцев (3 мужчин и 3 женщин) в возрасте от 27 до 46 лет.

Для оценки корригированной монокулярной остроты зрения дополнительно обследовалась в динамике группа из 6 человек, сопоставимых с испытуемыми экспериментальной группы по гендерно-возрастному составу (3 мужчины, средний возраст — 34,1 года; 3 женщины, средний возраст — 34 года). Исследования корригированной монокулярной остроты зрения в контрольной группе проводились параллельно эксперименту и согласно утвержденной схеме исследований.

Основные результаты исследования

Корригированная монокулярная острота зрения. В течение эксперимента стандартные отклонения значений корригированной монокулярной остроты зрения в обеих группах находились в диапазоне от 0,03 до 0,25. Для расстояний наблюдения оптометров 0,5; 1,0 и 4,0 м соответствующие пары усредненных по каждой группе значений стандартных отклонений оказались следующими: 0,11 и 0,11; 0,12 и 0,11; 0,12 и 0,10.

В табл. 1 представлены данные о динамике корригированной монокулярной остроты зрения в экспериментальной и контрольной группах, в которой изменение остроты зрения для каждого испытуемого рассчитывалось как разность между средними показателями трех измерений в конце и в начале изоляции соответственно. Такой способ расчета был принят с целью снижения влияния единичных случайных колебаний величины корригированной монокулярной остроты зрения на общий результат.

На расстояниях 1,0 и 4,0 м показатели корригированной монокулярной остроты зрения несколько возрастали у членов экипажа по сравнению с испытуемыми контрольной группы, однако изменения в обеих группах оказались статистически незначимыми.

Фотопические ЭРГ на диффузные вспышки. До эксперимента амплитуда и пиковая латентность волн стандартных фотопических ответов сетчатки (колбочковой ЭРГ на одиночные вспышки и световые мелькания с частотой 30 Гц) соответствовали значениям нормы. Оценивали корнео-негативную a -волну ЭРГ, отражающую функциональную активность фоторецепторов (в фотопической ЭРГ — колбочек сетчатки), и следующую за ней

Таблица 1. Динамика корригированной монокулярной остроты зрения в экспериментальной и контрольной группах

Расстояние, м	Средняя корригированная монокулярная острота зрения перед изоляцией		Среднее изменение корригированной монокулярной остроты зрения после изоляции	
	Испытуемые	Контрольная группа	Испытуемые	Контрольная группа
0,5	1,152	1,043	+0,006	–0,014
1,0	1,214	1,143	+0,058	+0,010
4,0	1,191	1,074	+0,072	+0,006

Таблица 2. Фотопические ЭРГ на диффузные стимулы (ISCEV-стандарт) до и после эксперимента

Для амплитуды $M \pm SD$	Колбочковая ЭРГ					ЭРГ на 30 Гц
	<i>a</i> -волна		<i>b</i> -волна		Индекс b/a , отн. ед.	
	<i>A</i>	<i>L</i>	<i>A</i>	<i>L</i>		<i>A</i>
До	21,6 ± 3,46	14,7	87,2 ± 7,2	30,8	4,3	74,4 ± 5,8
После	25,8 ± 1,8	14,3	86,6 ± 11,5	30,4	3,4	67,8 ± 11,3

Примечание. *A* — амплитуда, мкВ; *L* — пиковая латентность, мс.

в ЭРГ корнео-позитивную *b*-волну, генерация которой зависит от активности *ON*-биполярных клеток колбочковой системы и клеток Мюллера. Отношение амплитуды *b*-волны к амплитуде *a*-волны, или индекс b/a , используют для характеристики интерфейса наружной–внутренней сетчатки, причем b/a меняется и в случае нарушения синаптической передачи сигнала от фоторецепторов к биполярным клеткам, и при дисфункции нейронов сетчатки, вызванной ухудшением ретинального или хориоидального кровотока, при ишемизации сетчатки [8].

До и после эксперимента все показатели ЭРГ соответствовали средней статистической норме, и при сравнении амплитуд и пиковых латентностей волн ЭРГ (табл. 2) наблюдали лишь небольшие индивидуальные отклонения параметров, которые не выходили за пределы нормальной индивидуальной вариабельности. Поскольку в наших исследованиях амплитудные показатели биопотенциалов сетчатки слабо различались до и после изоляционного эксперимента, индекс b/a также не был изменен.

Ритмическая ЭРГ и глио-нейрональные взаимодействия в сетчатке. Для оценки влияния 4-месячного изоляционного эксперимента на глио-нейрональные взаимоотношения в сетчатке до и после пребывания в гермообъекте дополнительно к стандартным видам ЭРГ регистрировали фотопическую ритмическую ЭРГ на мелькания частотой 8,3; 10; 12 и 24 Гц [9]. Рассчитывали глиальный индекс (K_r) как отношение амплитуды *b*-волны стандартной колбочковой ЭРГ к амплитуде фотопической ритмической ЭРГ для каждой частоты световой стимуляции (табл. 3). Базовые значения амплитуды ритмических ответов сетчатки и глиального индекса K_r до эксперимента соответствовали средней статистической норме и после завершения эксперимента незначительно отличались от исходных величин для всех частот световой стимуляции.

Отмечено повышение индивидуальной и внутригрупповой вариабельности данных у испытуемых после выхода из эксперимента, но разница средних значений амплитуд ритмических ЭРГ в группе была статистиче-

ски незначима. Анализ фотопической ритмической ЭРГ и глиальных индексов свидетельствует о функциональной сохранности сетчатки как в слое фоторецепторов, так и во внутреннем ядерном слое, что подтверждает данные, полученные с помощью ЭРГ на одиночные вспышки света. Нарушений глио-нейрональных взаимоотношений в сетчатке не выявлено.

Паттерн-ЭРГ. Для оценки функциональной активности ганглиозных клеток регистрировали транзитную паттерн-ЭРГ на черно-белые реверсирующие паттерны и анализировали основные волны транзитной паттерн-ЭРГ — пики *P50* и *N95* (табл. 4).

При сравнении паттерн-ЭРГ до и после эксперимента отмечена тенденция к некоторому угнетению ответов. Однако эти изменения не были значимыми, и, более того, амплитуды *P50*- и *N95*-компонентов паттерн-ЭРГ на шахматные паттерны различных угловых размеров и до и сразу после завершения изоляции соответствовали значениям средней возрастной нормы. Пиковая латентность волн не изменена.

Таким образом, в среднем по группе у здоровых испытуемых условия проведения эксперимента не вызывали выраженной дисфункции ганглиозных клеток парво- и магноцеллюлярной систем и более дистальных нейронов макулярной области (фоторецепторов и биполярных клеток сетчатки).

Зрительные вызванные потенциалы. Регистрация ЗВП обеспечивает оценку интегральной целостности зрительных путей от сетчатки до зрительной коры, и большая часть ЗВП-ответа генерируется от макулярной области сетчатки (центральные 6–8° поля зрения) [11]. Нами оценивалось влияние изоляционного 4-месячного эксперимента на амплитуду и латентность основного положительного компонента ЗВП — пика *P100*. ЗВП записывали на паттерны с угловыми размерами 1° и 0,3° для отдельного анализа функционального состояния магно- и парвоцеллюлярных путей зрительной системы (табл. 5).

Таблица 3. Фотопические ритмические ЭРГ в спектре частот до и после эксперимента

Для амплитуды $M \pm SD$	8,3 Гц		10 Гц		12 Гц		24 Гц	
	<i>A</i>	K_r	<i>A</i>	K_r	<i>A</i>	K_r	<i>A</i>	K_r
До	103,3 ± 7,8	0,9	103,6 ± 8,4	0,9	102,5 ± 8,4	0,9	103,3 ± 11,4	0,86
После	96,7 ± 3,9	0,9	95,6 ± 4,3	1,4	95,5 ± 8,5	0,9	98,3 ± 7,5	0,9

Примечание. *A* — амплитуда, мкВ; K_r — глиальный индекс (амплитудное отношение *b*-волны колбочковой ЭРГ к ритмической ЭРГ).

Таблица 4. Паттерн-ЭРГ до и после эксперимента

Для амплитуды $M \pm SD$	16°			0,8°			0,3°		
	<i>P50</i>		<i>N95</i>	<i>P50</i>		<i>N95</i>	<i>P50</i>		<i>N95</i>
	<i>A</i>	<i>L</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>L</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>L</i>	<i>A</i>
До	17,7 ± 2,2	55,1	25,8 ± 1,3	16,9 ± 8,3	57,9	20,5 ± 1,6	9,5 ± 0,7	60,4	10,8 ± 1,0
После	15,9 ± 0,6	55,6	23,0 ± 1,4	14,1 ± 1,2	60,8	16,1 ± 1,4	8,5 ± 0,8	61,4	9,7 ± 1,1

Примечание. *A* — амплитуда, мкВ; *L* — пиковая латентность, мс.

Таблица 5. Паттерн-ЗВП до и после эксперимента

Для амплитуды $M \pm SD$	Стимул 1°			Стимул 0,3°		
	<i>A</i>	<i>L</i>	РКВ	<i>A</i>	<i>L</i>	РКВ
До	15,9 ± 4,1	103,3	47,4	14,2 ± 1,9	112,0	47,2
После	13,6 ± 1,4	105,1	44,6	12,7 ± 2,4	113,9	52,1

Примечание. *A* — амплитуда, мкВ; *L* — пиковая латентность, мс; РКВ — ретино-кортикальное время, т.е. разница в пиковой латентности между *P100* и *P50*, мс.

Все показатели *P100* на крупные и мелкие стимулы до и после эксперимента соответствовали значениям нормы. В среднем по группе изменения параметров ЗВП после эксперимента были статистически не значимы, хотя наблюдалась тенденция к снижению амплитуды *P100* для ответов и на крупные, и на мелкие паттерны. Ретино-кортикальное время, рассчитанное по разнице пиковой латентности *P100* ЗВП и *P50* компонента паттерн-ЭРГ, также практически не изменялось.

Дополнительные результаты исследования

При оценке индивидуальных вариаций биопотенциалов сетчатки и зрительной коры у членов экипажа обнаружены следующие особенности.

У двух испытуемых после выхода из эксперимента были значительно снижены амплитуды ритмической ЭРГ в правых глазах по сравнению с собственными исходными данными, несмотря на то что абсолютные значения показателей продолжали оставаться в пределах нормы (см. табл. 3, 4). Характерно, что у этих членов экипажа (оба правши) базовые значения ритмических ЭРГ правых глаз существенно превышали амплитуды ритмических ответов сетчатки, зарегистрированных для левых глаз. Для одного испытуемого амплитуды ритмических ЭРГ на частоту мельканий 8,3; 10; 12 и 24 Гц составляли после завершения эксперимента 82,4; 87,9; 85,4 и 78,3%; для другого испытуемого они равнялись 74; 74,6; 64 и 56,7% от исходных значений соответственно. То есть наибольшие отклонения от базовых значений документированы для фотопической ритмической ЭРГ на мелькания частотой 24 Гц.

Для левых глаз отмечены гораздо более слабые отклонения от базовых значений, которые соответствовали индивидуальной вариабельности данных.

При анализе индивидуальных изменений ЗВП у 3 испытуемых из 6 отмечено более резкое снижение амплитуды *P100* относительно исходных до эксперимента данных, при этом отсутствовали существенные изменения пиковой латентности и ретинокортикального времени. Снижение амплитуды в большей степени было выражено для ЗВП на мелкие шахматы, чем на крупные, т.е. отмечалась большая реакция на условия эксперимента функции парвоцеллюлярных каналов зрительной системы.

Нежелательные явления

Нежелательные явления в ходе проведения изоляционного эксперимента или электрофизиологических исследований отсутствовали.

Обсуждение

В субъективных психофизических исследованиях зрительных функций отмечена тенденция к смещению скорректированной монокулярной остроты зрения в сторону положительных значений в экспериментальной группе по сравнению с наблюдателями контрольной

группы, однако выявленные различия статистически недостоверны.

Данные объективных электрофизиологических исследований после завершения эксперимента в среднем по группе не отличались статистически значимо от базовых показателей ЭРГ и ЗВП, полученных до изоляции экипажа в гермообъекте. Более того, даже при выявлении существенных изменений биопотенциалов у отдельных испытуемых по сравнению с исходными данными их абсолютные значения укладывались в границы средне-статистических нормальных значений.

Однако необходимо отметить существование общей тенденции, состоящей в небольшом снижении амплитуды пиков *P50* и *N95* паттерн-ЭРГ и *P100* ЗВП на реверсивные паттерны и крупных, и малых угловых размеров. По характеру изменений основных волн паттерн-ЭРГ (*P50* и *N95*) можно судить об изменениях функциональной активности макулярной области и ганглиозных клеток сетчатки [12]. Учитывая данные об источниках генерации *P50*- и *N95*-компонентов ПЭРГ [13], их динамика после эксперимента свидетельствует о некотором снижении функции спайковых и неспайковых ON- и OFF-нейронов сетчатки, как парво-, так и магноцеллюлярной системы. Однако в среднем по группе разница параметров паттерн-ЭРГ членов экипажа до и после изоляционного эксперимента была статистически не значимой.

При этом ретинокортикальное время, рассчитанное по разнице пиковой латентности *P100* ЗВП и *P50* компонента паттерн-ЭРГ, не изменялось. Ретинокортикальное время отражает время проведения возбуждения от сетчатки до первичной зрительной коры, и стабильность его значений указывает на интегральную сохранность зрительных проводящих путей и отсутствие в среднем по группе статистически значимого влияния 4-месячного изоляционного эксперимента на проводимость парво- и магноцеллюлярных каналов зрительной системы.

Известно, что глиальные клетки сетчатки играют существенную роль в нормальном функционировании ретинальных нейронов, поддержании гомеостаза и компенсаторных (адаптивных) реакций сетчатки при воздействии различных факторов внешней и внутренней среды [14]. Так как взаимодействия между нейронами и глиальными клетками Мюллера представляют собой тесный функциональный симбиоз, дисфункция различных элементов этого симбиоза может привести к нарушению зрительных функций. В нашем исследовании, кроме повышения вариабельности данных, после завершения эксперимента средние значения амплитуды ритмических ЭРГ и глиальных индексов слабо отличались от исходных показателей, что говорит об отсутствии нарушений глио-нейрональных взаимоотношений в сетчатке между клетками Мюллера и колбочковыми фоторецепторами и биполярными клетками.

Отсутствие существенных изменений функциональной активности сетчатки и зрительной коры представляется закономерным для практически здоровых и физически тренированных участников эксперимента. Наши

результаты указывают, что в условиях искусственной среды в замкнутом пространстве 4-месячная изоляция не оказывает негативного влияния на функциональную адаптацию зрительной системы к условиям действия неблагоприятных факторов экстремальной среды. Сохранность показателей ЭРГ и ЗВП может отражать высокую стрессоустойчивость зрительной сенсорной системы. С другой стороны, продолжительность нашего эксперимента может быть недостаточной большой для выявления значимых закономерностей нарушения функции зрительной системы в экстремальной среде и оценки ее функционального резерва.

Косвенно на это указывают и выявленные нами персональные отличия в динамике данных электрофизиологических исследований у некоторых членов экипажа, у которых выявлено более значительное, чем у других испытуемых, угнетение ритмических ЭРГ и ЗВП.

Для правых глаз двух участников изоляционного эксперимента наибольшие изменения отмечены для фотопической ритмической ЭРГ на 24 Гц, доминирующим источником генерации которой в сетчатке являются колбочковые биполярные клетки [9, 14]. Эти члены экипажа (капитан и бортиженер) характеризовались высокой ответственностью к выполнению своих обязанностей и большим эмоциональным напряжением. Возможно, выявленные изменения активности нейронов сетчатки у капитана корабля и бортиженера, селективные для доминирующего глаза, можно связать с их более высокой зрительной нагрузкой по сравнению с другими членами экипажа.

При исследовании ЗВП у 3 испытуемых обнаружено более значительное уменьшение амплитуды P_{100} после изоляции, наиболее выраженное для ответов на мелкие паттерны с угловым размером $0,3^\circ$, которые характеризуют активность парвоцеллюлярных каналов зрительной системы. К этим испытуемым также относились капитан и бортиженер, т.е. лица, обязанности которых на борту предполагали наиболее высокую личную ответственность. Однако данные испытуемые отличались от других членов экипажа также тем, что на протяжении всего эксперимента регулярно занимались активными физическими тренировками (занятиями на тренажерах и боксом).

Известно, что социально-эмоциональные сигналы обрабатываются зрительной системой человека в приоритетном порядке для оптимизации социального поведения, и ЗВП часто используют для контроля активации зрительной коры при воздействии социально значимых стимулов [15]. На амплитуду и латентность ЗВП оказывают выраженное влияние различные стрессовые факторы. Например, при иммобилизации и холодном стрессе влияние на ЗВП опосредовано вызванной стрессом активацией перекисного окисления липидов [16]. При исследованиях профессиональных водителей установлено, что лишение сна в течение 27 ч приводит к общему удлинению времени реакции и увеличению ошибок в детекции локализованных на периферии поля зрения и центрированных на фовеа объектов и к уменьшению амплитуды P_{300} (индекс когнитивной обработки сигнала) в электроэнцефалограмме (ЭЭГ). В этой работе было показано, что лишение сна не связано с показателями раннего зрительного процессинга, однако было продемонстрировано устойчивое замедление обработки сигналов в парвоцеллюлярном зрительном пути [17].

В процессе изоляционного эксперимента SIRIUS18/19 были проведены три экспериментальные сессии с 30-часовой депривацией сна. Можно предположить, что от-

меченные нами изменения амплитуды P_{100} компонента ЗВП у половины испытуемых обусловлены их индивидуальной реакцией на депривацию сна. Однако, поскольку изменения на ранних уровнях обработки зрительного сигнала в упомянутой выше работе у водителей [17] не были выявлены при депривации сна, маловероятно, что исключительно только этот фактор повлиял на снижение ЗВП у 3 членов экипажа в нашем исследовании. Хотя следует признать возможность его влияния, учитывая, что наибольшие сдвиги амплитуды P_{100} нами отмечены для ответов именно на мелкие паттерны, стимулирующие ответы парвоцеллюлярной системы.

Следует обратить также внимание на другие аспекты влияния длительной изоляции. В литературе описаны психофизиологические нарушения, связанные с ухудшением настроения и когнитивных способностей при длительных космических полетах [18–21]. Понимание этих нарушений особенно важно, учитывая, что стабильное психологическое благополучие и когнитивные функции жизненно необходимы для успеха и безопасности таких миссий. Многочисленные факторы, такие как отсутствие естественного солнечного света, враждебная среда, измененное повседневное поведение, включая пищу и физическую активность, сенсорная депривация, ограниченное социальное общение между членами экипажа с одновременной изоляцией каждого от привычной среды и «нормального» общества, влияют на поведение и стрессоустойчивость экипажа в полярных или космических экспедициях [2, 4].

Считается, что сенсорная депривация связана с уменьшением кортикальной активности мозга [22]. Физиологические и психологические гипотезы объясняют связь между физическими упражнениями и настроением людей, находящихся в длительных экспедициях. Хотя лежащие в основе механизмы не до конца поняты, показано, что физические упражнения противодействуют психофизиологическому декондиционированию во время длительной изоляции, обусловленной измененной мозговой деятельностью [22–24]. Они являются потенциальной контрмерой, противодействующей психологической и когнитивной дезактивации, в дополнение к тем негативным эффектам, которые микрогравитация оказывает на костно-мышечную и сердечно-сосудистую системы во время космических миссий [18–21].

Европейское космическое агентство использует в качестве аналога условий космических полетов круглогодично действующую французско-итальянскую исследовательскую станцию Конкордия в Антарктике, расположенную на высоте 3233 м над уровнем моря на антарктическом плато Купол-С. Недавно опубликованы результаты исследований по влиянию длительной изоляции на активность мозга, настроение и когнитивные функции полярников, находящихся на этой станции в течение 9 мес. Изучалось также влияние физических упражнений на негативные последствия, связанные с длительной изоляцией в замкнутой, враждебной среде [2]. В этом исследовании показано, что регулярные физические упражнения оказывают положительное воздействие на настроение. По активности коры головного мозга полярники четко дифференцировались на две группы. Для физически активных членов экспедиции активность коры немного усиливалась в период от 1 до 2 мес от начала изоляции, а затем проявлялось параллельное снижение альфа- и бета-активности мозга. Нетренировавшиеся участники эксперимента, напротив, показали ухудшение настроения и отсутствие изменений в ЭЭГ. Авторы интерпретируют параллельное изменение

альфа- и бета-активности и поведения членов экспедиции как состояние общего снижения активности мозга при длительной изоляции [22]. Эти исследования продемонстрировали, что добровольные тренировки с определенной (неизнуряющей) интенсивностью положительно влияют на настроение и, соответственно, поведение людей и воспринимаемого ими физического состояния в изолированной, закрытой среде.

В нашем исследовании 3 члена экипажа с большим, чем у других испытуемых, угнетением пика P100 ЗВП отличались от остальных испытуемых тем, что регулярно занимались физическими упражнениями. Принимая во внимание результаты исследований в полярных экспедициях, можно предположить, что наши данные отражают высокий уровень физической и психофизиологической адаптации активных членов экипажа, возможно, сопряженных с компенсаторным (защитным) общим снижением активности мозга вообще и зрительной коры в частности.

Ограничения исследования

Четырехмесячный изоляционный эксперимент, возможно, является недостаточно длительным для выявления значимых закономерностей изменения функции зрительной сенсорной системы и оценки ее стрессоустойчивости, и исследования будут продолжаться в экспериментах с более продолжительной изоляцией и с детальной оценкой индивидуальной физической и психоэмоциональной нагрузки у отдельных членов экипажа.

Кроме того, было бы полезным в параллельных исследованиях у одних и тех же испытуемых оценить корреляции изменений корковой активности по данным ЭЭГ и биоэлектрической активности сетчатки и зрительной коры по данным ЭРГ и ЗВП.

Заключение

Условия 4-месячного изоляционного эксперимента не оказали статистически значимого влияния на корригированную монокулярную остроту зрения и функциональную активность сетчатки и зрительной коры, что представляется закономерным для практически здоровых и физически тренированных участников эксперимента. Однако у некоторых испытуемых определены индивидуально более выраженные изменения ритмических ЭРГ и ЗВП. Одним из факторов, влияющих на амплитуду

P100 ЗВП на мелкие паттерны, стимулирующие парвоцеллюлярный канал зрительной системы, может являться индивидуальная реакция на депривацию сна у членов экипажа, наделенных повышенной ответственностью. Кроме того, умеренное угнетение ЗВП может отражать высокий уровень физической и психофизиологической адаптации и стрессоустойчивости у физически активных членов экипажа. Для подтверждения полученных данных необходимы дальнейшие исследования, в том числе в изоляционных экспериментах большей длительности и при большем объеме выборки.

Дополнительная информация

Источник финансирования. Эксперимент по 4-месячной изоляции добровольцев в гермообъекте проводился в рамках базовой темы РАН № 63.2 «Исследование интегративных процессов в центральной нервной системе, закономерностей поведения и деятельности человека в условиях автономности и под влиянием других экстремальных факторов среды». Электрофизиологические исследования выполнены в рамках плановых НИР за счет бюджетных средств ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» Минздрава России. Публикация статьи осуществлена на личные средства авторского коллектива.

Конфликт интересов. Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

Участие авторов. В.В. Нероев — общая концепция исследований, руководство проектом; М.В. Зуева — организация электрофизиологических исследований, научный анализ проблемы и результатов, написание текста; И.В. Цапенко — проведение электрофизиологических исследований, обработка и научный анализ результатов, редактирование; Ю.А. Бубеев — организация эксперимента, психофизиологические исследования, редактирование; О.М. Манько — дизайн эксперимента, анализ литературы, редактирование; А.Е. Смолеевский — организатор циклограммы исследований, анализ результатов; А.М. Алескеров — анализ результатов корригированной монокулярной остроты зрения и электрофизиологических исследований; М.А. Грачева — проведение и анализ психофизиологических исследований. Все авторы прочли и одобрили окончательную версию рукописи перед публикацией.

ЛИТЕРАТУРА

- Mogilever NB, Zuccarelli L, Burles F, et al. Expedition Cognition: A review and prospective of subterranean neuroscience with spaceflight applications. *Front Hum Neurosci*. 2018;12:407. doi: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00407>
- Abeln V, MacDonald-Nethercott E, Piacentini MF, et al. Exercise in isolation — a countermeasure for electrocortical, mental and cognitive impairments. *PLoS One*. 2015;10(5):e0126356. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126356>
- Sandal G, Leon G, Palinkas L. Human challenges in polar and space environments. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2006;5:281–296. doi: <https://doi.org/10.1007/s1157-006-9000-8>
- Palinkas LA. The psychology of isolated and confined environments. Understanding human behavior in Antarctica. *Am Psychol*. 2003;58(5):353–363.
- Palinkas LA, Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions. *Lancet*. 2008;371(9607):153–163. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61056-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61056-3)
- Robinson S. Isolation Has Profound Effects on the Human Body and Brain. Here's What Happens. The Conversation. 3 Feb 2019. Available from: <https://theconversation.com/what-are-the-effects-of-total-isolation-an-expert-explains-109091>
- Садовничий В.А., Амелюшкин А.М., Ангелопулос В., и др. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов» // *Космические исследования*. — 2013. — Т. 51. — № 6. — С. 470–477. [Sadovnichiy VA, Amelyushkin AM, Angelopoulos V, et al. Space experiments aboard the Lomonosov MSU satellite Cosmic Research. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 2013;51:427–433. (In Russ.)]
- McCulloch DL, Marmor MF, Brigell MG, et al. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography (2015 update). *Doc Ophthalmol*. 2015;130(1):1–12. doi: <https://doi.org/10.1007/s10633-014-9473-7>
- Зуева М.В., Нероев В.В., Цапенко И.В., и др. Топографическая диагностика нарушений ретикулярной функции при регматогенной отслойке сетчатки методом ритмической ЭРГ

- широкого спектра частот // *Российский офтальмологический журнал*. — 2009. — Т. 1. — № 2. — С. 18–23. [Zueva MV, Neroev VV, Tsapenko IV, et al. Topographic diagnosis of retinal dysfunction in case of rhegmatogenous retinal detachment by the rhythmic ERG method of a wide range of frequencies. *Rossiyskiy Oftal'mologicheskiy Zhurnal*. 2009;1(2):18–23. (In Russ.)]
10. Bach M, Brigell MG, Hawlina M, et al. ISCEV standard for clinical pattern electroretinography (PERG): 2012 update. *Doc Ophthalmol*. 2013;126(1):1–7. doi: <https://doi.org/10.1007/s10633-012-9353-y>
 11. Odom JV, Bach M, Brigell M, et al. International Society for Clinical Electrophysiology of Vision. ISCEV standard for clinical visual evoked potentials (2016 update). *Doc Ophthalmol*. 2016;133(1):1–9. doi: <https://doi.org/10.1007/s10633-016-9553-y>
 12. Holder GE. Pattern electroretinography (PERG) and an integrated approach to visual pathway diagnosis. *Prog Retin Eye Res*. 2001;20(4):531–561. doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-9462\(00\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S1350-9462(00)00030-6)
 13. Luo X, Frishman LJ. Retinal pathway origins of the pattern electroretinogram (PERG). *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011;52(12):8571–8584. doi: <https://doi.org/10.1167/iov.11-8376>
 14. Зуева М.В., Цапенко И.В. Структурно-функциональная организация клеток Мюллера: роль в развитии и патологии сетчатки // *Клиническая физиология зрения. Очерки* / под ред. А.М. Шамшиновой. — М.: МБН, 2006. — С. 128–191. [Zueva MV, Tsapenko IV. Structural and functional organization of Müller cells: role in the development and pathology of the retina. *Klinicheskaya fiziologiya zreniya. Ocherki*. A.M. Shamshinova (ed.). Moscow: Nauchno-meditsinskaya firma MBN; 2006. S. 128–191. (In Russ.)]
 15. Wieser MJ, Miskovic V, Keil A. Steady-state visual evoked potentials as a research tool in social affective neuroscience. *Psychophysiology*. 2016;53(12):1763–1775. doi: <https://doi.org/10.1111/psyp.12768>
 16. Yaras N, Yargicoglu P, Agar A, et al. Effect of immobilization and cold stress on visual evoked potentials. *Int J Neurol*. 2003;113(8):1055–1067. doi: <https://doi.org/10.1080/00207450390203708>
 17. Jackson ML, Croft RJ, Owens K, et al. The effect of acute sleep deprivation on visual evoked potentials in professional drivers. *Sleep*. 2008;31(9):1261–1269.
 18. Kanas N. Psychosocial issues affecting crews during long-duration international space missions. *Acta Astronaut*. 1998;(1–8):339–361.
 19. Whitmore M, McQuilkin ML, Woolford BJ. Habitability and performance issues for long duration space flights. *Hum Perf Extrem Environ*. 1998;3(1):64–74.
 20. Heuer H, Manzey D, Lorenz B, Sangals J. Impairments of manual tracking performance during spaceflight are associated with specific effects of microgravity on visuomotor transformations. *Ergonomics*. 2003;46(9):920–934. doi: <https://doi.org/10.1080/0014013031000107559>
 21. Johannes B, Salnitski VP, Polyakov VV, Kirsch KA. Changes in the autonomic reactivity pattern to psychological load under long-term microgravity — twelve men during 6-month spaceflights. *Aviakosm Ekolog Med*. 2003;37(3):6–16.
 22. Schneider S, Brummer V, Carnahan H, et al. Exercise as a countermeasure to psycho-physiological deconditioning during long-term confinement. *Behav Brain Res*. 2010;211(2):208–14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.03.034>
 23. Ekkekakis P. Let them roam free? Physiological and psychological evidence for the potential of selfselected exercise intensity in public health. *Sports Med*. 2009;39(10):857–888. doi: <https://doi.org/10.2165/11315210-000000000-00000>
 24. Schneider S, Abeln V, Popova J, et al. The influence of exercise on prefrontal cortex activity and cognitive performance during a simulated space flight to Mars (MARS500). *Behav Brain Res*. 2013;236(1):1–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.08.022>
 25. Yeung RR. The acute effects of exercise on mood state. *J Psychosom Res*. 1996;40(2):123–141. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(95\)00554-4](https://doi.org/10.1016/0022-3999(95)00554-4)

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Зуева Марина Владимировна, д.б.н., профессор [*Marina V. Zueva*, PhD in Biology, Professor]; адрес: 105062, Москва, ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19 [address: 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya st, Moscow, 105062, Russia]; e-mail: visionlab@yandex.ru, SPIN-код: 8838-3997, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-5010>

Нероев Владимир Владимирович, д.м.н., профессор, академик РАН [*Vladimir V. Neroev*, MD, PhD, Professor, Academician of the RAS]; e-mail: secr@igb.ru, SPIN-код: 5214-4134, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8480-0894>

Цапенко Ирина Владимировна, к.б.н., старший научный сотрудник [*Irina V. Tsapenko*, PhD in Biology, Senior Researcher]; e-mail: sunvision@mail.ru

Бубеев Юрий Аркадьевич, д.м.н., профессор [*Yuri A. Bubeev*, MD, PhD, Professor]; e-mail: aviamed@inbox.ru, SPIN-код: 6548-0280

Манько Ольга Михайловна, д.м.н., ведущий научный сотрудник [*Olga M. Manko*, MD, PhD, Leading Researcher]; e-mail: olgamanko@list.ru, SPIN-код: 6090-4239

Смолевский Александр Егорович, к.м.н., старший научный сотрудник [*Alexandr E. Smolevskiy*, MD, PhD, Senior Researcher]; e-mail: smoll13@mail.ru, SPIN-код: 2993-6644

Алескеров Ахмед Магомедалиевич, врач-офтальмолог, младший научный сотрудник [*Akhmed M. Aleskerov*, MD, Junior Researcher]; e-mail: a.m.aleskerov@mail.ru

Грачева Мария Александровна, к.б.н., старший научный сотрудник [*Maria A. Gracheva*, PhD in Biology, Senior Researcher]; e-mail: mg.iitp@gmail.com, SPIN-код: 1164-7489