

doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-74-82

Влияние длительной микрогравитации на орган зрения. Обзор литературы

И. А. Макаров^{1,2}Ю. И. Воронков²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Научный центр неврологии, Волоколамское шоссе, д. 80, Москва, 125367, Российская Федерация

² Федеральное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр РФ — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, ул. Хорошевское шоссе, д. 76-А, Москва, 123007, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2016; 13 (2): 74-82

Обзор посвящен современному состоянию проблемы, связанной с изменением органа зрения при длительном воздействии микрогравитации на околоземной орбите. Описаны состояния, включающие наличие гиперметропического сдвига рефракции, изменений внутриглазного давления, повышения внутричерепного давления, изменений в области хориоидеи и сетчатки, отека диска зрительного нерва. Повышение внутричерепного давления, по всей вероятности, является основной причиной нарушений со стороны органа зрения в условиях микрогравитации. Причиной повышения внутричерепного давления является совокупность влияния различных факторов адаптационных механизмов в организме к условиям невесомости. Ведущую роль в развитии внутричерепной гипертензии занимает перераспределение жидкостей организма (крови и лимфы) по направлению к голове, но возможно также одновременное влияние и других факторов или их потенцирующее действие. Рассмотрена роль таких триггерных механизмов в развитии внутричерепной гипертензии в условиях микрогравитации, как анатомические особенности организма, расовая принадлежность, метаболические изменения под действием повышенного содержания углекислого газа в различных отсеках станции, высокое потребление натрия, ферментные дисфункции, силовые физические упражнения. Тем не менее, патогенетические механизмы в настоящее время пока еще остаются в стадии изучения. Важная роль при анализе механизмов адаптации отводится исследованиям не только до- и после полета, но и во время космического полета. Накопленные знания и опыт по преодолению изменений в органах и системах организма в условиях адаптации человека к микрогравитации позволят ответить на многие вопросы, связанные с осуществлением длительных и сверхдлительных полетов в условиях невесомости.

Ключевые слова: микрогравитация, изменение органа зрения, внутричерепное давление, внутриглазное давление

Формат цитирования: И.А. Макаров, Ю.И. Воронков. Влияние длительной микрогравитации на орган зрения. Обзор литературы. Офтальмология. 2016;13 (2): 74-82 doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-74-82

Прозрачность финансовой деятельности. Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

ENGLISH

Changes of the eye during long-term spaceflight. Review

I. A. Makarov^{1,2}, Y. I. Voronkov²

¹ Federal State Budget Scientific Institution Neurology Science center, Volokolamskoe road, 80, Moscow, 125367, Russia;

² Institute of medical-biological problems of Russian Science Academy, Horoshevskoe road, 76-A, Moscow, 123007, Russia

SUMMARY

The review includes the publications of the scientific literature on the eye change during long-term spaceflight. The any eye changes such as visual impairment, hyperopic shift in refraction, changes in the intraocular pressure, increased

the intracranial pressure, globe flattening, choroidal folding, optic disc edema, and optic nerve kinking and other changes were reported. The main cause of eye disorders, in all probability, is the increase of the intracranial pressure during long-term spaceflight. The reasons of the increased intracranial pressure are a collection of various factors of adaptation mechanisms in the body to weightless conditions. The leading role in the development of intracranial hypertension takes a redistribution of the body fluids (blood and lymph) in the direction of the head, but the opportunities and the effect of other factors are present. Also the displacement and increase of the internal organs volume of the chest can cause external compression of the jugular veins, increasing the pressure of the blood in them, and as the result to lead to the increase of the intracranial pressure. The role of trigger such mechanisms in the development of the intracranial hypertension in the microgravity environment as anatomical predisposition of the body, race, metabolic changes under the influence of high carbon dioxide content in the different compartments of the station, high sodium intake, the enzyme dysfunction, weight exercises of the astronauts was discussed. However, the pathogenic mechanisms is currently still under investigation. An important role in the study of the adaptation mechanisms is given to research not only before and after the flight, but also during the space flight. The accumulated knowledge and experience about the changes in organs and systems in the conditions of human adaptation to microgravity will help answer many questions related to the implementation of the long spaceflights.

Keywords: microgravity, visual impairment, intracranial pressure, intraocular pressure

For citation: I.A. Makarov^{1,2}, Y.I. Voronkov Changes of the eye during long-term spaceflight. Review. Ophthalmology in Russia. 2016;13 (2): 74-82 doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-74-82

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

Ophthalmology in Russia. 2016; 13 (2): 74-82

Микрогравитация — термин, используемый для обозначения состояния организма, находящегося в условиях, приближенных к невесомости. Известно, что притяжение Земли на околоземной орбите ослаблено более чем на 90% по сравнению с земной орбитой и изменяется в зависимости от ее высоты. Работают двигатели и механизмы станции, другие объекты создают условия для дополнительной гравитации.

В последние годы в зарубежной литературе появились сообщения о неблагоприятном воздействии микрогравитации на орган зрения. В частности, у 40-60% членов экипажа Международной космической станции (МКС) и 25% членов экипажей челноков SpaceTransportationsSystems (STS) было отмечено ухудшение зрения. Снижение остроты зрения корректировалось собирательными линзами в 1-2 диоптрии. Гиперметропический сдвиг происходил в различные периоды пребывания на орбите и обычно исчезал после возвращения на Землю. Однако у некоторых астронавтов эти изменения оставались на протяжении длительного времени и не были связаны с возрастной пресбиопией [1, 2]. Обследования астронавтов, проведенные как до, так и во время и после полета выявили ряд патологических изменений хориоидеи, сетчатки, зрительного нерва, а также дефекты полей зрения. Офтальмоскопически определялись складки хориоидеи (рис. 1), ватобразные очаги сетчатки (рис. 2), отек соска зрительного нерва (рис. 3). При ультразвуковом исследовании обнаружено уплощение заднего полюса глаза (рис. 4), отек подболобочного пространства зрительного нерва (рис. 5) [3, 4]. Кроме того, по данным обращаемости за офтальмологической помощью, у астронавтов США,

кроме снижения зрения, были отмечены следующие явления: дискомфорт в глазах, повышение внутриглазного давления, повышение внутричерепного давления, неврит зрительного нерва, помутнение стекловидного тела, оптическая нейропатия, перипапиллярный отек [5]. Ранее в отечественной литературе также сообщалось о наличии отека диска зрительного нерва у астронавтов после длительного пребывания на орбитальной станции «Мир» [6, 7].

Изучение изменений органа зрения у астронавтов в настоящее время является приоритетным в исследованиях на МКС. В настоящее время в исследовательском блоке американского сегмента МКС имеется целый ряд современного офтальмологического оборудования: офтальмотонометр, цифровая фундус-камера, портативный ультразвуковой аппарат, оптический когерентный томограф и др. Все исследования выполняются самими астронавтами в условиях телемедицинской связи с Землей [8, 9].

Патогенетические механизмы развития изменений со стороны органа зрения большинство исследователей связывает с внутричерепной гипертензией [1, 2, 3, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Головной мозг, как известно, отделен от костного черепа тремя оболочками, между которыми (сосудистой и паутинной) находится субарахноидальное пространство. Мозг снабжается кровью по внутренней сонной и позвоночной артериям, отток крови происходит через систему церебральных вен, синусов и внутренних яремных вен. У взрослого здорового человека в сосудистой системе головного мозга содержится около 150 мл крови, из которых 100 мл — в венозной системе. Субарахноидальное пространство

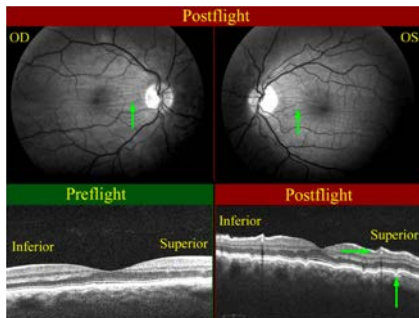


Рис. 1. На черно-белой фотографии визуализируются хориоидальные складки (показаны зелеными стрелками). Изображения, полученные с помощью оптического когерентного томографа до- (preflight) и после (postflight) космического полета. (Nelson E. S., et al.).

Fig. 1. Choroidal folds (green arrows) as seen on the right (OD, upper left), and left (OS, upper right) globes. The wavy pattern (highlighted by green arrows) in the choroidal/retinal layer shown in the OCT image taken post-flight (bottom right) relative to the pre-flight OCT image (bottom left) exhibits the presence of choroidal folds. (Nelson E. S., et al.).

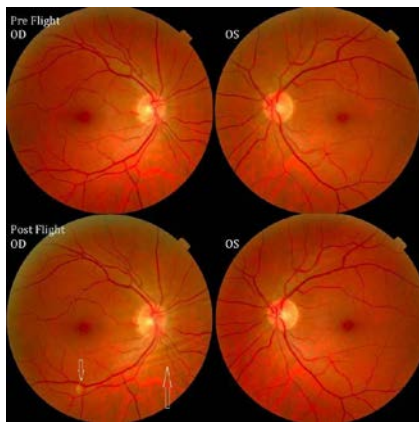


Рис. 2. Фотографии глазного дна до- и после полета. Определяются хориоидальные складки и «ватообразный» очаг (указаны стрелками). (Alexander D.J., et al.).

Fig. 2. Fundus examination of eye changes from long-duration spaceflight. Fundus examination revealed choroidal folds inferior to the optic disc and a single cotton-wool spot in the inferior arcade of the right eye (white arrows). (Alexander D.J., et al.).

связано с желудочками мозга и заполнено ликвором, который вырабатывается постоянно, примерно, со скоростью 0,3 мл в мин. Всасывание ликвора происходит через арахноидальные ворсинки в сагиттальный и сигмовидный венозный синус. Это происходит бла-

годаря наличию разницы между внутричерепным давлением, составляющим порядка 11 мм рт. ст., и давлением в венозных дуральных синусах, составляющим около 6 мм рт. ст. Величина внутричерепного давления не постоянна и зависит от положения тела, глубины дыхания, при этом, повышается при кашле, при выполнении пробы Вальсальвы, при задержке дыхания и натуживании [18, 19].

Повышение внутричерепного давления в земных условиях может быть вызвано различными причинами, в числе которых кровоизлияния в мозг, черепно-мозговые травмы, увеличение мозгового кровотока, нарушение церебрального венозного оттока. Идиопатическая внутричерепная гипертензия, не связанная с какими-либо причинами, встречается в 19 случаях на 100000 человек в год [20]. Больные при этом жалуются на головные боли, усиливающиеся к утру и в горизонтальном положении, а также при кашле и натуживании, тошноту, иногда рвоту, шум в ушах. Офтальмологическим признаком повышенного внутричерепного давления, как известно, является застойный сосок зрительного нерва. Застой обуславливается в этом случае анатомическими особенностями субарахноидального пространства, которое простирается до заднего полюса глаза, непосредственно затрагивая ретробульбарное пространство глазницы. При повышении давления в субарахноидальном пространстве возникает компрессия волокон зрительного нерва, затрудняющая венозный отток и аксоплазматический ток, что может приводить к перипапилярному отеку, а в тяжелых случаях — к отеку соска зрительного нерва. В то же время, волокна зрительного нерва вместе с сосудами входят внутрь глаза через решетчатую пластинку склеры, обладающую некоторой эластичностью. В норме вследствие превышения внутриглазного давления

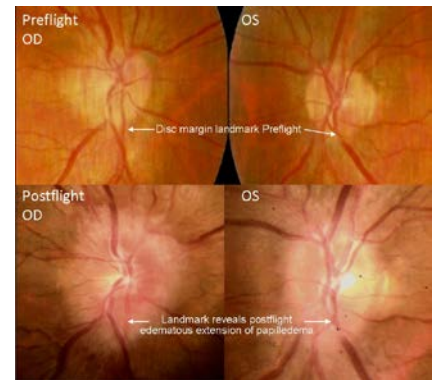


Рис. 3. Фотографии глазного дна до- и после космического полета. Визуализируется увеличение диаметра диска зрительного нерва за счет его отека (границы диска зрительного нерва до- и после полета указаны стрелками). (Nelson E. S. et al.).

Fig. 3. Fundus examination of eye changes from long-duration spaceflight. Fundoscopic images of the right and left optic disc showing profound grade 3 edema at the right optic disc and grade 1 edema at the left optic disc. (Nelson E. S. et al.).

над внутричерепным, решетчатая пластинка вогнута в сторону мозга. При очень высоком давлении в супрахориоидальном пространстве пластинка, наоборот, смещается в сторону глаза. Степень смещения, по-видимому, зависит от упругих свойств решетчатой пластинки и величины внутричерепного давления. Тем не менее, в ряде случаев смещенная решетчатая пластинка приводит к ущемлению зрительного нерва и сосудов, вызывая иногда выраженный отек соска зрительного нерва [21, 22].

Помимо отека соска зрительного нерва, в условиях невесомости и после космического полета у астронавтов наблюдалось появление складок хориоидеи и уплощение глазного яблока. Последнее хорошо визуализировалось при ультразвуковом исследовании и магнитно-резонансной томографии (рис. 4 и 5). Как правило, центральное зрение при этом сохранялось высоким, с учетом гиперметропической коррекции, но в периферическом зрении отмечено увеличение размеров слепого пятна, появление относительных и абсолютных скотом. В условиях микрог-



Рис. 4. Ультразвуковое исследование глаза астронавта во время длительного космического полета. Видно уплощение заднего полюса глаза, повышенная извилистость зрительного нерва, подболобочное пространство зрительного нерва расширено, отек диска зрительного нерва, увеличенное внутричерепное давление. (Nelson E.S., et al).

Fig. 4. On-orbit ultrasound of posterior orbit from long-duration spaceflight. In-flight ultrasound image showing posterior globe flattening and a raised optic disc consistent with optic-disc edema and raised ICP. (Nelson E.S., et al).

равитации все астронавты имеют увеличение внутричерепного давления, однако адаптация к новым условиям происходит легче и с меньшими осложнениями у более молодых. К настоящему времени зрительные расстройства отмечены преимущественно у астронавтов старше 45 лет. Предполетное медицинское обследование по имеющимся данным не выявило каких-либо признаков хронических заболеваний типа артериальной гипертензии и диабета, астронавты не принимали каких-либо препаратов, приводящих к повышению внутричерепного давления [1, 3].

При уменьшении силы тяжести происходит перераспределение жидкости организма и крови в системе кровеносных сосудов, а также лимфы. Кровенаполнение распределяется по всему телу равномерно, так что объем крови в верхней половине тела и в голове становится больше, чем в условиях гравитации. С потерей гравитации происходит смещение внутренних органов, ослабляется мускулатура, в том чи-

сле, диафрагма и внутренние мышцы, изменяется форма грудной клетки [23]. Грудная клетка расширяется, и, как следствие, снижается внутригрудное давление. Это сопровождается увеличением трансмурального давления и наполнением кровью сердца и, соответственно, расширением его размеров, прежде всего, левого желудочка, что в итоге приводит к увеличению диастолического объема и сердечного выброса. Перераспределение и увеличение внутренних органов грудной клетки может быть причиной внешнего сдавления яремных вен, повышения давления крови в них, и как следствие, повышения внутричерепного давления. [24, 25, 26]. Тем не менее, после космического полета многие сердечно-сосудистые изменения, связанные с воздействием микрогравитации, в земных условиях исчезают [27, 28].

На Земле в условиях гравитации гидростатическое давление вдоль вертикальной оси человеческого тела различно. Так, на уровне головы среднее артериальное давление у здорового человека составляет около 70 мм рт. ст., на уровне сердца — порядка 100 мм рт. ст., а на уровне ног — 200 мм рт. ст. [19, 29]. Человеческий организм в период своей эволюции приспособился жить в условиях земного притяжения с обеспечением доставки крови к мозгу в направлении противоположном силе тяжести. Анатомические особенности строения венозной системы направлены на оптимальный отток венозной крови. Этому способствует наличие клапанного механизма в венах нижних конечностей, обеспечивающего движение венозной крови против силы тяжести и отсутствие этого механизма в венах верхней половины тела и головы для движения крови в направлении вектора гравитации [30].

Наоборот, сразу после достижения условий невесомости происходит перераспределение жидкости по направлению к голове, что про-

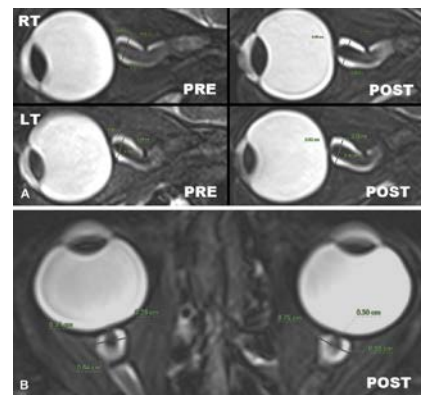


Рис. 5. Магнитно-резонансная 3 Т томография орбиты: PRE: предполетный и POST: после полета. Определяется увеличение толщины оболочек зрительного нерва и расширение подболобочного пространства, уплощение заднего полюса глаза. (Nelson E.S., et al).

Fig. 5. The 3 T magnetic resonance images of PRE and POST long-duration spaceflight. Regarding optic nerve sheath distention, posterior globe flattening, optic disc protrusion (indicative of edema), increased optic nerve diameter, and increased tortuosity of the optic nerve. (Nelson E.S., et al).

является одутловатостью лица и шеи, хемозом конъюнктивы, увеличением просвета и кровенаполнения вен верхней половины тела, шеи и головы, уменьшением объема ног [23, 31, 32]. Субъективно человек уже в первые минуты начинает испытывать чувство распирания в голове, заложенность носа. По этой причине, из-за перераспределения крови, повышается давление в венозной системе глаза и изменяется градиент между внутриглазным давлением, что является причиной уменьшения всасывания внутриглазной жидкости в венозные синусы и эписклеральные вены [4]. Так, в течение нескольких минут по достижении микрогравитации внутриглазное давление повышается до 92% от исходного. В условиях дальнейшей адаптации организма к невесомости уже через 6 часов давление снижается до предполетного [33], а при длительных полетах имеет место тенденция к гипотонии глаза [21, 34]. Имеются сообщения, что длительная гипотония глаза может быть

причиной появления случаев отека диска зрительно-го нерва, уплощения заднего полюса глаза, появления складок хориоидеи и гиперметропического сдвига рефракции [35, 36].

Хотя перераспределение крови и является ведущим пусковым моментом в развитии внутричерепной гипертензии, дискутируются и другие факторы, которые в совокупности могут быть причиной зрительных расстройств астронавтов.

Одна из гипотез связывает повышение внутричерепного давления с индивидуальным строением головного мозга, а именно, с меньшими размерами желудочков мозга и субарахноидального пространства. Предполагается, что в этих случаях имеется анатомическая предрасположенность к внутричерепной гипертензии [3]. Также было установлено, что внутричерепная гипертензия развивается при длительной физической нагрузке в процессе восхождения альпинистов в период развития приступов острой горной болезни [37, 38].

Другая гипотеза связана с чрезмерным влиянием углекислого газа, который является естественным продуктом метаболизма человека, концентрация которого увеличивается в изолированном пространстве. В земной атмосфере концентрация углекислого газа составляет 0,039%. Воздух в помещениях содержит от 0,08 до 0,1% [39]. Исследования, проведенные на здоровых субъектах, показали, что в течение 40 дней при нахождении человека в помещении с умеренно повышенным уровнем углекислого газа (меньше 11 мм рт. ст.) не отмечено каких-либо неблагоприятных эффектов [40]. Длительное воздействие более высоких концентраций приводит к компенсаторному развитию метаболического ацидоза, вазодилатации и повышению внутричерепного давления [41, 42, 43]. Принято считать 15 мм рт. ст. верхним пределом для нештатных ситуаций и 20 мм рт. ст. аварийным уровнем [31, 40].

Условия невесомости меняют в организме человека многие процессы, в частности, не способствуют эффективному удалению излишнего углекислого газа от лица астронавтов, поскольку нет конвекции воздуха. В этих условиях на помощь приходит принудительная вентиляция воздушного потока. Однако на станции в некоторых неветилируемых местах возможно появление очагов повышенной концентрации газа, более мощные вентиляторы мешают астронавтам.

Гиподинамия является одним из ведущих неблагоприятных факторов в полете. Отсутствие силы тяжести и физической нагрузки приводит к изменениям в костной, мышечной и соединительной ткани, вплоть до резорбции костей и мышечной атрофии [44, 45]. Российская система физической подготовки и тренировок на борту свидетельствует о том, что физические упражнения на специальных тренажерах являются чрезвычайно важными для профилактики патологических изменений [46]. Физические упражнения

всегда применяли при длительных космических полетах [47]. Обычно они включали упражнения на велоэргометре и беговой дорожке. Однако отечественные и зарубежные исследования показали, что упражнения на этих тренажерах обеспечивают, как правило, сохранение достаточной мышечной массы, но оказываются не всегда эффективными в профилактике остеопороза [48]. В связи с этим в американском сегменте МКС дополнительно был применен силовой тренажер «ARED», с помощью которого астронавты выполняют стандартный набор резистивных упражнений с нагрузкой до 300 кг, включающий приседания, поднятие ног вверх, отжимания. У астронавтов, активно тренирующихся на ARED с высокой нагрузкой, было выявлено увеличение силы мышц тела и конечностей, плотности костей скелета, в том числе, поясничного отдела позвоночника [49].

Известно, что при физической нагрузке повышается артериальное давление, а это в ряде случаев может негативно сказываться на саморегуляции мозгового кровообращения [50]. Процесс саморегуляции включает в себя ряд физиологических механизмов, позволяющих защищать мозг от чрезмерной перфузии во время изменений кровяного давления [50, 51]. Этот механизм активизируется в течение 3-5 сек. в ответ на изменение артериального давления и поддерживает мозговое кровообращение на необходимом уровне при колебании систолического давления от 70 до 150 мм рт. ст. [52]. Кроме повышения артериального давления, в ходе выполнения силовых упражнений, связанных особенно с поднятием тяжестей, происходит резкое повышение внутригрудного и центрального венозного давления, что препятствует венозному оттоку из головного мозга по яремной венозной системе, приводя к снижению церебрального перфузионного давления и повышению внутричерепного давления [53]. При выполнении силовых упражнений спортсмены нередко задерживают дыхание при поднятии тяжелого веса, как при маневре Вальсальвы. Это может сопровождаться головкружением и «полетами», а в ряде случаев, приводить к кратковременной потере сознания из-за снижения частоты сердечных сокращений, уменьшения сердечного выброса и, соответственно, уменьшения венозного возврата и снижения мозгового кровообращения. Установлено, что при выполнении пробы Вальсальвы и поднятии тяжестей в положении лежа снижается скорость мозгового кровотока на 35% [54]. Кроме того, при выполнении пробы Вальсальвы значительно возрастает внутриглазное давление за счет увеличения давления в яремной и глазной вене, и, соответственно, имеет место снижение градиента [54, 55]. Длительные упражнения в условиях, близких к пробе Вальсальвы, помимо увеличения внутриглазного давления, приводят к отеку хориоидеи, появлению скотом в поле зрения [56, 57, 58].

При выполнении упражнений на силовом тренажере «ARED» астронавты на МКС используют индивидуальную норму поднятия «веса» и количества упражнений, что снижает риск резкого повышения внутричерепного и внутриглазного давления. По-видимому, рекомендованные врачами и правильно выполняемые физические упражнения с использованием силового тренажера не являются ведущим фактором в повышении внутричерепного давления астронавтов на МКС, однако этот механизм необходимо учитывать.

Диета астронавтов также является важной и неотъемлемой составляющей на протяжении всего космического полета. Одним из главных компонентов любой диеты является поваренная соль. Обычно соль используется для улучшения вкусовых качеств пищи. В соли содержится 40% натрия и 60% хлоридов. Натрий — жизненно-необходимый микроэлемент, играет важную роль в нормальном функционировании клеток, поддержании водно-солевого баланса внутри клетки и pH среды. Эпидемиологические исследования выявляют прямую связь между количеством потребляемого натрия и артериальным давлением [59, 60]. В последние годы рекомендации американских диетологов ограничивают употребление натрия не более 2300 мг в день, а лицам с гипертензией — не более 1500 мг. Однако в рационе питания астронавтов на МКС потребление натрия регламентировано 3000 мг в день. В реальности же, как показывают отчеты, потребление натрия выше, и в ряде случаев достигает до 14000 мг в день. Объясняется это тем, что большинство космических продуктов являются коммерческими и содержат более высокое содержание натрия с целью улучшения вкуса и продления срока годности [61, 62]. Кроме того, на орбите потребление продуктов оказалось гораздо выше, чем рекомендовано. Как показывают исследования, снижение потребления натрия уменьшает артериальное давление, однако этот эффект зависит от предшествующей гипертензии, возраста (старше 45 лет), пола и национальной принадлежности (выше у женщин и афроамериканцев). Высокий уровень содержания натрия в организме вызывает перемещение жидкости из интерстициального во внутрисосудистое пространство для компенсации временно повышенной концентрации натрия в сыворотке и ее осмолярности [63]. Это увеличение объема крови и объема плазмы может явиться фактором увеличения венозного объема и ухудшения венозного оттока по яремной сосудистой системе, и как следствие, повышения внутричерепного давления. Считается, что снижение потребления натрия в условиях микрогравитации должно способствовать улучшению самочувствия астронавтов, уменьшению риска гипертензии, но не является ведущим фактором в развитии повышенного внутричерепного давления [12, 64].

Одним из факторов в патогенезе развития внутричерепной гипертензии может рассматриваться так на-

зываемая ферментативная дисфункция в процессе биологических реакций метилирования при синтезе нуклеиновых аминокислот, результатом чего является накопление одноуглеродистого метаболита гомоцистеина в плазме. Его повышенный уровень по сравнению с нормой был выявлен у астронавтов, имеющих зрительные расстройства, причем, как до полета, так и во время полета [65]. Ранее повышенный уровень гомоцистеина, как сильнейшего нейротоксина, был идентифицирован как фактор риска для ишемического инсульта, нарушений мозгового кровообращения, ишемической болезни сердца, внутричерепных аневризм, мигрени, окклюзий сосудов сетчатки и глаукомы [12]. Одна из гипотез токсического воздействия одноуглеродистых метаболитов заключается в том, что в процессе адаптации организма астронавта к невесомости в результате затруднения венозного оттока по яремным венам и повышения внутричерепного давления высокие уровни гомоцистеина могут оказывать токсические эффекты на зрительный нерв и хориоидею, вызывая их отек и патологические изменения [66].

Учитывая полиморфное влияние микрогравитации на орган зрения, связанное, в том числе, с обменными процессами, для нормализации состояния пациентов, подвергшихся микрогравитации, и профилактики развития осложнений, представляется целесообразным проведение антиоксидантной терапии. Как показали различные исследования, одним из наиболее эффективных антиоксидантных препаратов является Эмоксипин, который препятствует перекисному окислению липидов клеточных мембран, улучшая метаболизм в различных тканях и клетках организма [67,68].

Таким образом, в процессе адаптации человека к длительной микрогравитации, на борту МКС и STS у астронавтов выявлен целый ряд изменений со стороны органа зрения. Скорее всего, перечисленные нами изменения зрения, по всей видимости, имели место у астронавтов и раньше, с начала первых длительных космических полетов на орбите, однако в последние годы эти процессы стали рассматриваться учеными в качестве первостепенных условий адаптации человека для обеспечения безопасности длительных космических путешествий к иным планетам. За те годы, в которые человечество осуществляло освоение околоземной орбиты, накоплен большой опыт и знания для преодоления неблагоприятных явлений во время микрогравитации и ее влияния на многие системы и органы человеческого организма.

Повышение внутричерепного давления, по всей вероятности, является основной причиной нарушения со стороны органа зрения в условиях микрогравитации. Причиной повышения внутричерепного давления, как уже было сказано, является совокупность влияния различных факторов адаптационных механизмов в организме к условиям невесомости. Перерас-

пределение жидкости (крови и лимфы) внутри организма, анатомические особенности организма, расовая принадлежность, метаболические изменения под действием повышенного содержания углекислого газа в различных отсеках станции, высокое потребление натрия, ферментные дисфункции, силовые физические упражнения определяют сегодня полиморфизм факторов в этиологии внутричерепной гипертензии. Ведущую роль в развитии внутричерепной гипертензии играет перераспределение жидкости организма по направлению к голове, но возможно и одновременное влияние разных факторов (или их потенцирующее действие), особенно при длительном влиянии микрогравитации на организм человека. Тем не менее, патогенетические механизмы в настоящее время пока еще остаются в стадии изучения. Вот почему очень

важную роль в понимании этого механизма играют не только предполетное и послеполетное всестороннее клинико-диагностическое обследование, но и исследование органа зрения, оценка состояния внутричерепного давления, функциональных изменений сердечно-сосудистой системы и других систем организма непосредственно во время полета. Накопленные знания и опыт по преодолению изменений органов и систем организма в условиях адаптации человека к микрогравитации позволяют ответить на многие вопросы, связанные с осуществлением длительных и сверхдлительных полетов в условиях невесомости.

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции

поступила 08.09.15 / received 08.09.15

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Mader T.H., Gibson C.R., Pass A.F., Lee A.G., Killer H.E., Hansen H.C., Der-vay J.P. Unilateral loss of spontaneous venous pulsation in an astronaut. *J. Neuro-Ophthalmol.* 2015;35:226-227.
- Mader T.H., Gibson C.R., Pass A.F., Killer H.E., Lee A.G. Optic disc edema in an astronaut after repeat long-duration space flight. *J. Neuro-Ophthalmol.* 2013;33 (9):249-255.
- Alexander D.J., Gibson C.R., Hamilton D.R., Lee S.M. C., Mader T.H., Otto C., Oubre C.M., Pass A.F., Platts S.H., Scott J.M., Smith C.M., Stenger M.B., Westby C.M., Zanello S.B., and space administration. Risk of spaceflight-induced intracranial hypertension and vision alterations (evidence report). NASA; 2012.
- Nelson E.S., Mulugeta L., Myers J.S. Microgravity-induced fluid shift and ophthalmic changes (review). *Life*; 2014;4 (4):621-665.
- Wotring V.E. *Space Pharmacology*; 2012, N.Y.:Springer.
- Myasnikov V.I., Stepanova S.I. [Features of cerebral hemodynamics in cosmonauts before and after flight on the MIR orbital station. In: *Orbital Station MIR. [Space Biology and Medicine]. Kosmicheskaja biologija i medicina Vol. 2, Biomedical Experiments.* Moscow, Russia: Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, 2002, Chapter 5:300-304. (in Russ.).
- Jennings R.T., Stepanek J.P., Scott L.R., Voronkov Y.I. Frequent premature ventricular contractions in an orbital spaceflight participant. *Aviat Space Environ Med.*; 2010;81 (6):597-601.
- Johnston S.L., Arenare B.A., Smart K.T. Telemedicine. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.). *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer.163-180.
- Simmons S.C., Hamilton D.R., McDonald P.V. Medical imaging. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 181-211.
- Bogomolov V.V., Kuz'min M. P., Danilichev S.N. [On the intracranial hypertension in astronauts during long-term microgravity]. K voprosu o vnutricherepnoj gipertenzii u astronautov v uslovijah dlitel'noj nevесomosti. [Aerospace and Environmental Medicine]. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Medicina.* 2015;49 (4):54-58. (in Russ.).
- Zhang L.F., Hargens A.R. Intraocular/Intracranial pressure mismatch hypothesis for visual impairment syndrome in space. *Aviat. Space Environ. Med.*; 2014;85:597-601.
- Smith S.M., Rice B.L., Dlouhy Y., Zwart S.R. Assessment of nutritional intake during spaceflight and spaceflightanalogs. *Procedia Food Science*; 2013;2:27-34.
- Marshall-Bowman K., Barratt M.R., Gibson C.M. Ophthalmic changes and increased intracranial pressure associated with long duration spaceflight: An emerging understanding. *Acta Astronautica*; 2013;87 (4):77-87.
- Berdahl J.P., Fleischman D., Allingham R.R., Fautsch M. Disc swelling and space flight. *Ophthalmology*; 2012;119 (12):1290.
- Kramer L.A., Sargsyan A.E., Hasan K.M., Polk J.D., Hamilton D.R. Orbital and intracranial effects of microgravity: findings at 3-T MR Imaging. *Radiology*; 2012;263:1-9.
- Wiener T.C. Space obstructive syndrome: intracranial hypertension, intraocular pressure, and papilledema in Space. *Aviatin, Space, and environmental medicine*; 2012;83 (1):64-66.
- Clark J.B., Allen C.S. Ophthalmologic concerns. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 535-545.
- Partington T., Farmery A. Intracranial pressure and cerebral blood flow (review article). *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*; 2014;15 (4):189-194.
- Hamilton D.R. Neurologic Concerns. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer.361-381.
- Acheson J.F. Idiopathic intracranial hypertension and visual function. *Brit. Med. Bulletin*, 2006;85-86 (1):233-244.
- Berdahl J.P., Yu D.Y., Morgan W.M. The translaminal pressure gradient in sustained zero gravity, idiopathic intracranial hypertension, and glaucoma. *Medicine Hypotheses*; 2012;79 (5):719-724.
- Marek B., Harris A., Kanakamedala P., Lee E., Amireskandari A., Carichino L., Guidoboni G., Tobe L.A., Siesky B. Cerebrospinal fluid pressure and glaucoma: Regulation of trans-lamina cribrosa pressure. *Br.J. Ophthalmol*; 2014;98:721-725.
- Gilles C. *Fundamentals of Space Medicine* (2-nd eds.). 2006, Amsterdam: Springer.
- White R.J., Blomqvist C.G. Central venous pressure and cardiac function during spaceflight. *J. Appl. Physiol.*; 1998;85 (2):738-746.
- Sams C.F., Pierson D.L. Cardiovascular Disorders. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 317-361.
- Hargens A.R., Richardson S. Cardiovascular adaptations, fluid shifts, and countermeasures related to space flight. *Respiratory Physiology & Neurobiology*; 2009;169 (10):S30-S33.
- Verbanck S., Larsson H., Linnarsson D., Prisk G.K., West J.B., Paiva M. Pulmonary tissue volume, cardiac output, and diffusing capacity in sustained microgravity. *J. Appl. Physiol.*; 1997;83 (3):810-816.
- Grigoriev A.I., Kotovskaya A.R., Fomina G.A. The human cardiovascular system during space flight. *Acta Astronautica*, 2011;68 (3):1495-1500.
- Ruwanpathirana T., Owen A., Reid C.M. Review on cardiovascular risk prediction. *Cardiovascular Therapeutics*; 2015;33 (2):62-70.
- Kim D.H., Parsa C.F. Space flight and disc edema. *Ophthalmology*; 2012;119:2420-2421.
- Baker E.S., Barratt M.R., Wear M.L. Human Response to Space Flight. In *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*, by Michael R. Barratt and Sam L Pool, Chapter 2. New York, NY: Springer, 2008. P.27-54.
- Blaber A.P., Zuj, K. A., Goswami, N. Cerebrovascular autoregulation: Lessons learned from spaceflight research. *Eur.J. Appl. Physiol.*; 2013;113:1909-1917.
- Draeger J., Schwartz R., Groenhoff S., Stern C. Self-tonometry under microgravity conditions. *Clinic. Investig.*; 1993;71 (9):700-703.
- Keith F.M., MaderTh.H. Ophthalmic concerns. In: Barratt M.L., Pool S.M. (eds). Chapter 25. *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*. 2008, NY:Springer, 534-544.
- Westfall A.C., Ng J.D., Samples J.R., Weissman J.L. In reply to Brodsky MC. Flattening of the posterior sclera: hypotony or elevated intracranial pressure?

- Am.J. Ophthalmol. 2004;138:511-512.
36. Costa V. P, Arcieri E.S. Hypotony maculopathy. *Acta Ophthalmol. Scand.* 2007;85:586-597.
 37. Keyes L.E., Paterson R., Boatright D., Browne V., Leadbetter G., Hackett P. Optic nerve sheath diameter and acute mountainsickness. *Wilderness and environmental medicine*; 2013;24 (2):105-111.
 38. Carod-Artal F.J. High-altitude headache and acute mountain sickness. *Neurologia (English Ed.)*; 2014;29 (9):533-540.
 39. Kostoglou K., Debert C.T., Poulin M.J., Mitsis G.D. Nonstationary multivariate modeling of cerebral autoregulation during hypercapnia. *Medical Engineering & Physics*; 2014;36 (5):592-600.
 40. James J.T. Hypoxia, hypercarbia, and atmospheric control. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 445-475.
 41. Blaha M., Aaslid R., Douville C.M., Corrae R., Newell D.W. Cerebral blood flow and dynamic cerebral autoregulation during ethanol intoxication and hypercapnia. *Journ. of Clinical Neuroscience*; 2003;10 (2):195-198.
 42. Carrera E., Lee L.K., Giannopoulos S., Marshall R.S. Cerebrovascular reactivity and cerebral autoregulation in normal subjects. *Journ. Neurological Sciences*; 2009;285 (1-2):191-194.
 43. Wang D., Yee B.J., Wong K.K., Kim J.W., Dijk D.J. Comparing the effect of hypercapnia and hypoxia on the electroencephalogram during wakefulness. *Clinical Neurophysiology*; 2015;126 (1):103-109.
 44. Jones J.A., Pietrzyk R.A., Whitson P.A. Musculoskeletal Response to Space Flight. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 293-307.
 45. Deng C., Wang P., Zhang X., Wang Y. Short-term, daily exposure to cold temperature may be an efficient way to prevent muscle atrophy and bone loss in a microgravity environment. *Life Sci. Space Res.* 2015;5:1-5.
 46. Kozlovskaja I.B., Pestov I.D., Egorov A.D. [The countermeasure system for extended space flights]. *Kontrizmeritel'naja sistema dlja dlitel'nyh kosmicheskikh poletov. [Aerospace and Environmental Medicine]. Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Medicina*. 2008;42 (6):66-73. (in Russ).
 47. Cavanagh P.R., Genc K.O., Gopalakrishnan R., Kuklis M.M., Maender C.C., Rice A.J. Foot forces during typical days on the International Space Station. *Journ. Biomech.*; 2010;43 (08):2182-2188.
 48. Genc K.O., Gopalakrishnan R., Kuklis M.M., Maender C.C., Rice A.J. Foot forces during exercise on the International Space Station. *Journ. Biomech.*; 2010;43 (11):3020-3027.
 49. Loehr J.A., Lee S.M., English K.L., Sibonga J., Smith S.M. Musculoskeletal adaptations to training with the advanced resistive exercise device. *Med. Sci. Sports Exerc.*; 2011;43 (1):146-156.
 50. Lin Y.L., Po H.L., Hsu H.Y., Chung C.P., Sheng S.P., Hu H.H. Transcranial doppler studies on cerebral autoregulation suggest prolonged cerebral vasoconstriction in a subgroup of patients with orthostatic intolerance. *Ultrasound in Medicine and Biology*; 2011;37 (10):1554-1560.
 51. Talman W.T., Dragon D.N., Lin L.H. Baroreflex influences on cerebrovascular autoregulation. *Autonomic Neuroscience*; 2015;192 (11):28.
 52. Powers W.J., Zazulia A.R. Cerebral metabolism and blood flow. *Encyclopedia of the Neurological Sciences* (2-nd ed.); 2014, N-Y:Verlag, P.683-684.
 53. Mousavi S.R., Fehlner A., Streitberger K.-J., Braun J., Samani A. Measurement of in vivo cerebral volumetric strain induced by the Valsalva maneuver. *Journ. Biomech.*; 2014;47 (7):1652-1657.
 54. Mills P.E., Hooper D.W., Chang P.L., Wolf R. Effects of Valsalva's manoeuvre on intraocular pressure. *Can.J. Ophthalmol.*; 1994;79:2973-2976.
 55. Vieira G.M., Oliveira H.B., Tavares D., Bottaro M., Ritch R. Intraocular pressure variation during weight lifting. *Arch. Ophthalmol.*; 2006;124 (10):1251-1254.
 56. Gurwood A.S. Effects of weight lifting on intraocular pressure. *Optometry*; 2007;78 (2):51-52.
 57. Peters N., Holtmannspötter M., Büttner U. Valsalva-maneuver induced recurrent transient bilateral visual loss. *Clin. Neurol. and Neurosurgery*; 2011;113 (2):150-152.
 58. Falcão M., Vieira M., Brito P., Rocha-Sousa A., Brandão E.M. Spectral-domain optical coherence tomography of the choroid during Valsalva maneuver. *Amer.J. Ophthalmol.*; 2012;154 (4):687-692.
 59. Stamler J. The Intersalt study: background, methods, findings, and implications. *Am.J. Clinical Nutrition*; 1997, 65 (supl.): 626S-642S.
 60. Graudal N. Population data on blood pressure and dietary sodium and potassium do not support public health strategy to reduce salt intake in Canadians. *Can.J. Cardiology*; 2015, available online 20.
 61. Hodapp M.H. Spaceflight metabolism and nutritional support. In Barratt M. R, Pool S.L. (eds.) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*; 2008, N. Y.:Springer. 559.
 62. Siamwala J.H., Rajendran S., Chatterjee S. Chapter Eight – Strategies of manipulating BMP signaling in microgravity to prevent bone loss. *Vitamins and Hormones*; 2015;99:249-272.
 63. Stolarz-Skrzypek K., Staessen J.S. Reducing salt intake for prevention of cardiovascular disease – times are changing. *Advances in Chronic Kidney Disease*; 2015;22 (2):108-115.
 64. Delahaye F. Should we eat less salt? Review Article. *Archives of Cardiovascular Diseases*; 2013;106 (5):324-332.
 65. Zwart S.R., Gibson C.R., Mader T.H., Ericson K., Ploutz-Snyder R., Heer M., Smith S.M. Vision changes after space flight are related to alterations in folate- and Vitamin B-12-dependent one-carbon metabolism. *Journ. Nutr.* 2012;142:427-431.
 66. Ajith T.A. Homocysteine in ocular diseases (review). *Clin.Chim.Acta*; 2015;441:6-17.
 67. Andgelova D.V. Current approaches to hemophthalmia treatment. Review. *Ophthalmology*. 2012;9 (2):8-10. (In Russ.)
 68. Trufanov S.V., Malozhen S.A., Polunina E.G., Pivin E.A., Tekeeva L.Y. Recurrent corneal erosion syndrome (a review). *Ophthalmology*. 2015;12 (2):4-12. (In Russ.)

Сведения об авторах

Макаров Игорь Анатольевич, доктор медицинских наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Научный центр неврологии», Волоколамское шоссе, д. 80, Москва, 125367, Российская Федерация, igor-niigb@yandex.ru, 8-905-706-71-83

Воронков Юрий Иванович, доктор медицинских наук, профессор ФБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, ул. Хорошевское шоссе, д. 76-А, Москва, 123007, Российская Федерация, info@imbp.ru

Affiliation

Igor Makarov, PhD, Senior Research Officer of Neurology Science center, Volokolamskoe road, 80, Moscow, 125367, Russia, igor-niigb@yandex.ru, 8-905-706-71-83

Y.I. Voronkov, PhD, professor, Institute of medical-biological problems of Russian Science Academy, Horoshevskoe road 76-A, Moscow, 123007, Russia 8-499-195-23-63, info@imbp.ru