

<https://doi.org/10.25276/0235-4160-2019-2-59-64>  
УДК 617.7

## Изучение функциональной адаптации зрительной системы в условиях экспериментальных режимов искусственной гравитации, создаваемой на центрифуге короткого радиуса

Б.Э. Малюгин<sup>1</sup>, М.И. Колотева<sup>2</sup>, Н.А. Поздеева<sup>3, 4</sup>, Т.А. Морозова<sup>2</sup>, С.М. Пикусова<sup>4</sup>, Д.В. Сычёва<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Москва;

<sup>2</sup> ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва;

<sup>3</sup> ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Чебоксарский филиал;

<sup>4</sup> ГАУ ЧР ДПО «Институт усовершенствования врачей» Минздрава Чувашской Республики, Чебоксары

### РЕФЕРАТ

**Цель.** Провести оценку функциональной адаптации зрительной системы в условиях экспериментальных режимов искусственной гравитации, создаваемой на центрифуге короткого радиуса.

**Материал и методы.** В исследовании принимали участие 9 практически здоровых добровольцев (9 глаз) в возрасте 31,2±6 лет. Каждый испытуемый прошёл 3 вращения на центрифуге короткого радиуса (ЦКР). Действующим фактором в испытаниях являлись перегрузки направления «голова-таз». Вращения проводились в трех режимах, в дальнейшем условно обозначенных: «Режим 1», «Режим 2», «Режим 3» (максимальная величина перегрузок на уровне стоп до 2,0; 2,4 и 2,9 G соответственно). До и после каждого вращения испытуемым выполняли рефрактометрию, определяли диаметр зрачка, внутриглазное давление (ВГД) и гидродинамические показатели глаза, оценивали гемодинамику в сосудах глаза, орбиты и внутренней сонной артерии (ВСА).

**Результаты.** ВГД после вращения в режимах 1 и 2 не изменилось, в режиме 3 – снизилось по данным тонометрии на 1,0 мм рт.ст.

( $p=0,024$ ), по данным тонографии на 2,8 мм рт.ст. ( $p=0,007$ ), что коррелировало со снижением скорости продукции внутриглазной жидкости на  $0,67 \text{ мм}^3$  ( $p=0,046$ ).

После вращения в режиме 1 скорость кровотока в ВСА и глазной артерии (ГА) не изменилась, в режиме 2 конечная диастолическая скорость кровотока в ВСА снизилась на 2,6 см/с ( $p=0,011$ ), в ГА – не изменилась, в режиме 3 скорость кровотока в ВСА не изменилась, в ГА – повысилась на 9,5 см/с ( $p=0,015$ ).

**Заключение.** Изменения гемо- и офтальмогидродинамики у здоровых испытуемых укладываются в пределы нормальных значений, что свидетельствует о том, что зрительная система обладает широкими возможностями функциональной адаптации к условиям экспериментальных режимов искусственной гравитации.

**Ключевые слова:** искусственная гравитация, центрифуга короткого радиуса, внутриглазное давление, гидродинамика глаза. ■

**Авторы не имеют финансовых или имущественных интересов в упомянутых материале и методах.**

Офтальмохирургия. 2019;2:59–64.

### ABSTRACT

#### Study of functional adaptation of the visual system in the conditions of experimental modes of artificial gravity, created on a short-radius centrifuge

B.E. Malyugin<sup>1</sup>, M.I. Koloteva<sup>2</sup>, N.A. Pozdeyeva<sup>3, 4</sup>, T.A. Morozova<sup>2</sup>, S.M. Pikusova<sup>4</sup>, D.V. Sychova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Moscow;

<sup>2</sup> SSC RF – The Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow;

<sup>3</sup> The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, the Cheboksary Branch, Cheboksary;

<sup>4</sup> The Institute of Advanced Medical Training of Doctors of the Health Ministry of the Chuvash Republic, Cheboksary

**Purpose.** To evaluate the functional adaptation of the visual system in the conditions of experimental modes of artificial gravity created on a short-radius centrifuge.

**Materials and methods.** The study involved 9 healthy volunteers (9 eyes) aged 31.2±6 years. Each test person has passed 3 rotations

on the short-radius centrifuge. The current factor in the tests was the overloads in the direction of «head-pelvis». Rotations were carried out in three modes, further conditionally designated «Mode 1», «Mode 2», «Mode 3» (maximum value of overloads at feet level up to 2.0; 2.4 and 2.9 G, respectively). Before and after each rotation the subjects underwent



refractometry, determined pupil diameter, intraocular pressure and hydrodynamic parameters of the eye, evaluated hemodynamics in the vessels of the eye, orbit and internal carotid artery.

**Results.** Intraocular pressure after the rotation in the modes 1 and 2 did not change, in the mode 3 – decreased by 1.0 mmHg according to tonometry ( $p=0.024$ ), according to tonography by 2.8 mmHg ( $p=0.007$ ) which correlated with a decrease in the rate of intraocular fluid production by 0.67 mm<sup>3</sup> ( $p=0.046$ ).

After rotation in the mode 1 the blood flow rate in the internal carotid artery and the ophthalmic artery did not change, in the mode 2 the final diastolic blood flow rate in the internal carotid artery decreased by 2.6

cm/s ( $p=0.011$ ), in the ophthalmic artery did not change, in the mode 3 the blood flow rate in the internal carotid artery did not change, in the ophthalmic artery – increased by 9.5 cm/s ( $p=0.015$ ).

**Conclusions.** Changes hemo- and ophthalmo-hydrodynamics in healthy subjects are within normal limits, which suggest that the visual system has wide possibilities of functional adaptation to the conditions of experimental modes of artificial gravity.

**Key words:** artificial gravity, short-radius centrifuge, intraocular pressure, hydrodynamics of the eye. ■

**No author has a financial or proprietary interest in any material or method mentioned.**

Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2019;2:59–64.

## АКТУАЛЬНОСТЬ

С развитием космических технологий и увеличением продолжительности космических полетов все чаще встает вопрос о сведении к минимуму негативного влияния длительного пребывания в космосе на организм человека в целом и зрительный анализатор в частности.

Микрогравитация – термин, используемый для обозначения состояния организма, находящегося в условиях, приближенных к невесомости. Космонавты, работающие на околоземной орбите, находятся именно в таких условиях: притяжение Земли здесь ослаблено более чем на 90% и изменяется в зависимости от высоты орбиты [1]. При нахождении человека в среде, приближенной к невесомости, происходит перераспределение крови из ног и нижней половины туловища в верхнюю половину и голову, с чем связаны нежелательные изменения в организме, в том числе отражающиеся и на органе зрения [1, 2].

Агентством NASA были предоставлены данные проекта «Нарушения зрения и внутричерепного давления» (Vision Impairment and Intracranial Pressure (VIP) – англ.), где отмечены результаты обследований астронавтов после длительных космических экспедиций. В нем, в

частности, указаны такие явления со стороны органа зрения, как ухудшение остроты зрения, гиперметропический сдвиг рефракции, отек диска и подболобочного пространства зрительного нерва, появление хориоидальных складок, уплощение заднего полюса глаза [3-7]. Предполагается, что зафиксированные отклонения связаны с увеличением внутричерепного давления, которое может быть обусловлено несколькими механизмами, включая движение артериальных, венозных и цереброспинальных жидкостей по направлению к голове из-за потери вектора силы тяжести, присутствующей на Земле и действующей в направлении от головы до ног [3-7].

Из-за перераспределения крови в условиях космоса повышается давление в венозной системе глаза и изменяется градиент между ВГД и внутричерепным давлением, что является причиной уменьшения всасывания внутриглазной жидкости в венозные синусы и эписклеральные вены [8]. В течение нескольких минут по достижении микрогравитации ВГД повышается до 92% от исходного, при дальнейшей адаптации организма к невесомости уже через 6 часов ВГД снижается до предполетного [1, 9], а при длительных полетах имеется тенденция к гипотонии глаза [1, 10-13].

Решением проблем, связанных с патологическими изменениями организма в условиях микрогравитации, может стать использование во время длительных космических полетов искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса (ЦКР). В процессе вращения человека на ЦКР происходит

имитация воздействия на него естественного земного притяжения, что влечет за собой обратное перераспределение крови из головы и верхней половины туловища в нижнюю половину и ноги. Предполагается, что данную установку можно разместить в отдельном модуле Международной космической станции или межпланетного корабля, что поможет существенно уменьшить отрицательные последствия нахождения в условиях микрогравитации на организм человека.

Однако на сегодняшний день остается неясным влияние искусственной гравитации на изменения функционального состояния зрительного анализатора и, в частности, гидро- и гемодинамику глазного яблока. Кроме того, не определены и не стандартизированы наиболее значимые методы мониторинга состояния органа зрения в условиях космоса и при нагрузках такого рода.

## ЦЕЛЬ

Проведение оценки функциональной адаптации зрительной системы в условиях экспериментальных режимов искусственной гравитации, создаваемой на центрифуге короткого радиуса.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследовании участвовали 9 чел. (9 глаз) в возрасте 31,2±6 лет (от 25 до 40 лет). Критериями включения в исследуемую группу являлись следующие: добровольцы (мужчины) в возрасте 25-40 лет; все испы-

### Для корреспонденции:

Морозова Татьяна Анатольевна,  
канд. мед. наук, врач-офтальмохирург  
ORCID ID: 0000-0002-3320-5366  
E-mail: TatianaMorozovaMD@gmail.com.

Таблица 1

Оценка показателей ВГД до испытаний и после 3-х вращений на ЦКР (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)

Table 1

Evaluation of intraocular pressure before and after 3 rotations on short-radius centrifuge (Me {P<sub>25</sub>, P<sub>75</sub>}, n=9)

Показатель Parameter	Фоновые данные Background data	После вращения в режиме 1 After rotation in the mode 1	После вращения в режиме 2 After rotation in the mode 2	После вращения в режиме 3 After rotation in the mode 3
ВГД, мм рт.ст. IOP, mm Hg	13 {12; 15}	12 {11; 13}, p=0,184	12 {10; 13}, p=0,072	12 {10; 13}, p=0,024

Примечание: n – количество испытуемых, ВГД – внутриглазное давление, p – критерий Вилкоксона.

Note: n – number of test persons, IOP – intraocular pressure, p – Wilcoxon test.

тупые были отобраны на основании заключения медицинской комиссии, в соответствии с которым были признаны практически здоровыми и подписали информированное добровольное согласие на участие в исследовании. К критериям исключения относили людей с соматической и глазной патологией.

Программа исследований утверждена на заседании Ученого совета ГНЦ РФ – ИМБП РАН и прошла экспертизу в комиссии по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН.

Все добровольцы проходили по три вращения на ЦКР, в дальнейшем условно обозначенные «Режим 1», «Режим 2», «Режим 3», отличающиеся между собой максимальной величиной перегрузки направления «голова-таз» на уровне стоп (2,0; 2,4 и 2,9 G), длительностью нахождения на максимальной величине перегрузки и общим временем воздействия. В процессе вращения на человека действовала искусственная сила тяжести – перегрузки в направлении «голова-таз» (+Gz). Сразу по окончании работы центрифуги испытуемых обследовали различные специалисты-медики. Оценка основных показателей функциональной адаптации зрительной системы проводили в течение первого-второго часа после воздействия перегрузок. Между повторными вращениями одного испытуемого выдерживали интервал не менее двух суток.

До начала испытаний у участников исследования была определена острота зрения с помощью таблиц Сивцева-Головина. До и в течение первого-второго часа после каждого вращения у испытуемых проводили определение статической рефрак-

ции и диаметра зрачка (авторефрактометр HRK-7000A Huvitz, Корея), ВГД (тонометр ICare HOME, Финляндия), гидродинамических показателей (тонограф ТНЦ-100, Россия), показателей кровотока во внутренней сонной артерии, основных артериях орбиты и глазного яблока (Logiq P9 General Electrics Healthcare, США).

У двух испытуемых в ходе вращения в режиме 2 отмечали ухудшение самочувствия (появление предвестников потери сознания), поэтому вращение прекратили досрочно.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы STATISTICA 10 (США). Предварительно был сделан расчет минимального количества испытуемых для статистического анализа, данные считались статистически значимыми при уровне значимости  $p < 0,05$ . Учитывая неправильный характер распределения данных, при статистической обработке использовались показатели непараметрической статистики: медиана (Me), верхний (P<sub>75</sub>) и нижний (P<sub>25</sub>) квартили, критерий Вилкоксона (p).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Некорригированная острота зрения участников составила 1,1 {0,65; 1,63}, острота зрения с максимальной коррекцией 1,25 {1; 1,63}.

ВГД до испытаний составило 13 {12; 15} мм рт.ст. После вращений в режимах 1 и 2 оно снизилось, однако это изменение статистически незначимо ( $p > 0,05$ ). После вращения в режиме 3 ВГД достоверно снизилось на 1,0 мм рт.ст. по сравнению с исходными данными ( $p = 0,024$ ) (табл. 1).

Истинное ВГД и скорость продукции внутриглазной жидкости после вращений в режимах 1 и 2 снизились статистически недостоверно ( $p > 0,05$ ). После вращения в режиме 3 истинное ВГД значимо снизилось на 2,8 мм рт.ст. ( $p = 0,007$ ) за счет снижения скорости продукции внутриглазной жидкости на 0,67 мм<sup>3</sup>/мин ( $p = 0,046$ ) (табл. 2).

Коэффициент легкости оттока после вращения в режимах 1 и 2 увеличился, после вращения в режиме 2 снизился, однако это увеличение не было статистически значимо ( $p > 0,05$ ). Коэффициент Беккера не показал достоверных изменений после 3 вращений в зависимости от исходных данных ( $p > 0,05$ ) (табл. 2).

Конечная диастолическая скорость кровотока в ВСА показала значимое снижение на 3,6 см/с после вращения в режиме 2 ( $p = 0,011$ ), а после вращения в режимах 1 и 3 снижение конечной диастолической скорости кровотока было статистически недостоверным ( $p > 0,05$ ). Скорость кровотока в глазной артерии увеличилась на 9,5 см/с после вращения в режиме 3 ( $p = 0,015$ ), а после вращения в режиме 2 недостоверно увеличилась ( $p > 0,05$ ). Остальные показатели значимо не изменились (табл. 3).

Показатели сферического и цилиндрического компонентов рефракции, диаметр зрачка после 3 вращений статистически значимо не изменились ( $p > 0,05$ ) (табл. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения ВГД, гидро- и гемодинамики глаза входят в пределы нормальных значений, что говорит о

Таблица 2

Оценка показателей тонографии до испытаний и после 3-х вращений на ЦКР (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)

Table 2

Evaluation of tonography parameters before and after 3 rotations on short-radius centrifuge (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)

Показатель Parameter	Фоновые данные Background data	После вращения в режиме 1 After rotation in the mode 1	После вращения в режиме 2 After rotation in the mode 2	После вращения в режиме 3 After rotation in the mode 3
P <sub>0</sub> , мм рт.ст. P <sub>0</sub> , mm Hg	16,2 {14,3; 17,1}	15,4 {13,8; 15,9}, p=0,309	15,8 {14,7; 16,7}, p=0,453	13,4 {12,9; 15,6}, p=0,007
C, мм <sup>3</sup> /мин × мм рт.ст. C, mm <sup>3</sup> /min × mmHg	0,32 {0,26; 0,41}	0,4 {0,26; 0,59}, p=0,478	0,37 {0,33; 0,59}, p=0,82	0,26 {0,24; 0,3}, p=0,603
F, мм <sup>3</sup> /мин F, mm <sup>3</sup> /min	1,88 {1,37; 2,53}	2,38 {1,23; 3,06}, p=0,981	2,41 {1,69; 3,47}, p=0,691	1,21 {0,67; 1,53}, p=0,046
КБ CB	50 {33; 53}	35 {28; 53}, p=0,554	39 {27; 50}, p=0,798	51 {42; 61}, p=0,619

Примечание: n – количество испытуемых, P<sub>0</sub> – истинное внутриглазное давление, C – коэффициент легкости оттока, F – скорость продукции внутриглазной жидкости, КБ – коэффициент Беккера, p – критерий Вилкоксона.

Note: n – number of test persons, P<sub>0</sub> – true intraocular pressure, C – coefficient of outflow facility, F – rate of production of intraocular fluid, CB – Becker coefficient, p – Wilcoxon test.

Таблица 3

Характеристика кровотока в ВСА и сосудах глаза до испытаний и после 3-х вращений на ЦКР (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)

Table 3

Characteristics of blood flow in the internal carotid artery and vessels of the eye before and after 3 rotations on the short-radius centrifuge (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)

Показатель Parameter	Фоновые данные Background data	После вращения в режиме 1 After rotation in the mode 1	После вращения в режиме 2 After rotation in the mode 2	После вращения в режиме 3 After rotation in the mode 3
Ps в ВСА, см/с Ps in ICA, cm/s	82,4 {77,2; 82,4}	82,4 {77,2; 82,4}, p=0,893	82,4 {74,7; 82,4}, p=0,675	82,4 {78; 82,4}, p=0,371
ED в ВСА, см/с ED in ICA, cm/s	24 {20,1; 27,9}	21,4 {16,2; 24}, p=0,109	21,4 {17,5; 22,7}, p=0,011	21,4 {17,5; 25,3}, p=0,214
MD в ВСА, см/с MD in ICA, cm/s	20,1 {17,5; 24}	20,1 {16,2; 24}, p=0,500	18,15 {16,2; 21,4}, p=0,500	21,4 {16,2; 25,3}, p=0,273
PI в ВСА PI in ICA	1,81 {1,59; 5,24}	1,85 {1,62; 2,29}, p=0,767	2,05 {1,76; 4,96}, p=0,674	1,92 {1,52; 2,54}, p=0,767
RI в ВСА RI in ICA	0,73 {0,63; 0,79}	0,77 {0,71; 0,81}, p=0,594	0,79 {0,77; 1,26}, p=0,208	0,77 {0,71; 0,87}, p=0,515
ГА, см/с OA, cm/s	23,6 {20,1; 31,9}	23,6 {20,4; 33,1}, p=0,636	30,1 {20,7; 35}, p=0,314	33,1 {30,4; 35}, p=0,015
ЗКЦА, см/с PSCA, cm/s	12,9 {10,4; 14,8}	12,7 {9,8; 14,1}, p=0,674	14 {11,3; 14,2}, p=0,767	12,8 {12,1; 13,5}, p=0,594
ЦАС, см/с CAR, cm/s	11,7 {10,4; 12,9}	11 {9,1; 11,7}, p=0,441	11,1 {11; 13,4}, p=0,674	14,2 {11,8; 15,4}, p=0,110

Примечание: n – количество испытуемых, Ps – максимальная систолическая скорость кровотока во внутренней сонной артерии (ВСА), ED – конечная диастолическая скорость кровотока в ВСА, MD – средняя скорость кровотока за сердечный цикл в ВСА, PI – индекс пульсации / индекс Гослинга в ВСА, RI – индекс периферического сопротивления / индекс Пурсело в ВСА, ГА – скорость кровотока в глазной артерии, ЗКЦА – скорость кровотока в задних коротких цилиарных артериях, ЦАС – скорость кровотока в центральной артерии сетчатки, p – критерий Вилкоксона.

Note: n – number of test persons, Ps – maximum systolic blood flow rate in internal carotid artery, ED – end-diastolic blood flow rate in internal carotid artery, MD – average flow velocity over the cardiac cycle in internal carotid artery, PI – pulsatile index / index of Gosling in internal carotid artery, RI – index of peripheral resistance / index Purselo in internal carotid artery, OA – blood rate in the ophthalmic artery, PSCA – flow rate in the short posterior ciliary arteries, CAR – flow rate in the Central retinal artery, p – Wilcoxon test.

Таблица 4

**Оценка показателей сферического и цилиндрического компонентов рефракции, диаметра зрачка до испытаний и после 3-х вращений на ЦКР (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)**

Table 4

**Performance measurement of sphere and cylinder, pupil diameter before and after 3 rotations on short-radius centrifuge (Me {P<sub>25</sub>; P<sub>75</sub>}, n=9)**

Показатель Parameter	Фоновые данные Background data	После вращения в режиме 1 After rotation in the mode 1	После вращения в режиме 2 After rotation in the mode 2	После вращения в режиме 3 After rotation in the mode 3
Sph	0 {-0.5; 0.25}	-0.25 {-1.0; 0}, P=0,650	-0.5 {-1.0; 0.25}, p=0,359	-0.5 {-0.75; 0.25}, p=0,917
Cyl	-0.56 {-0.75; 0}	-0.5 {-0.75; -0.25}, p=0,735	-0.5 {-0.5; -0.5}, p=0,463	-0.5 {-0.75; -0.25}, p=0,646
Диаметр зрачка, мм Pupil diameter, mm	5.6 {5.4; 6.2}	5.8 {5.5; 6.1}, p=0,918	5.7 {5.6; 5.9}, p=0,642	5.5 {5.3; 5.8}, p=0,896

Примечание: n – количество испытуемых, sph – сферический компонент рефракции, cyl – цилиндрический компонент рефракции, p – критерий Вилкоксона.

Note: n – number of test persons, sph – sphere, cyl – cylinder, p – Wilcoxon test.

большом диапазоне функциональной адаптации глаза к нагрузкам, связанным с повышенной гравитацией, поэтому ЦКР является безопасной для организма человека с точки зрения отсутствия критических или значимых изменений органа зрения.

Внутриглазная жидкость продуцируется клетками беспигментного эпителия отростков цилиарного тела: из кровяного русла капилляров ресничных отростков в заднюю камеру ионы и вещества небольшой молекулярной массы проходят благодаря функционированию энергозависимой транспортной системы [14]. Можно предположить, что в условиях повышенной гравитации за счет перераспределения кровотока из головы и верхней половины туловища в нижнюю половину и ноги происходит относительное уменьшение кровенаполнения сосудов цилиарных отростков, вследствие чего снижается продукция камерной влаги, а за ней и ВГД.

Зафиксированное повышение скорости кровотока в глазной артерии после вращения в режиме 3, вероятно, можно расценить как компенсаторную реакцию со стороны организма в ответ на обратное перераспределение крови в направлении «ноги-голова».

В литературе имеются единичные публикации о воздействии гипергравитации на организм чело-

века. Под руководством академика РАМН, профессора Г.П. Котельникова на базе Самарского государственного медицинского университета появилось новое направление в медицине – гравитационная терапия [15]. Сеансы вращения на ЦКР проходили больные с переломами костей нижних конечностей, что позволяло за счет улучшения кровотока добиться сращения костей в более ранние сроки и избежать осложнений. Проведены клинические наблюдения, показавшие высокую эффективность гравитационной терапии в профилактике и лечении атеросклероза нижних конечностей, облитерирующего энтерита, диабетической стопы и других заболеваний [15].

Е.С. Пшеницына проводила изучение влияния гипергравитации на внутриглазную гидродинамику, установив снижение ВГД у пациентов, не страдающих заболеваниями органа зрения и проходивших лечение по поводу травм опорно-двигательного аппарата с помощью сеансов вращения на ЦКР [16-17]. Полученный результат исследователь связала с активацией оттока внутриглазной жидкости под воздействием сеансов гравитационной терапии. Однако в нашем исследовании мы отметили достоверное снижение внутриглазного давления и уменьшение продукции внутриглазной жидкости при недостоверном увеличении её оттока, поэтому этот вопрос

требует дальнейшего изучения.

Наиболее значимыми методами исследования состояния органа зрения в условиях гипергравитации являются тонометрия, тонография, цветное доплеровское картирование сосудов глаза и орбиты, ультразвуковая доплерография сонных артерий. В перспективе возможно использование компьютерной периметрии и количественного анализа кровотока в сосудистых сплетениях сетчатки с помощью оптической когерентной томографии в ангио-режиме.

Анализ результатов изменений внутриглазной гидро- и гемодинамики в условиях повышенной гравитации представляет интерес в клинической практике с точки зрения поиска новых методов лечения первичной открытоугольной глаукомы и анализа этиопатогенеза.

Сосудистую концепцию развития глаукомы описывали академик С.Н. Федоров и профессор В.И. Козлов: с возрастом происходит атеросклеротическое поражение сосудистой стенки, в том числе и стенки ГА, что ведет к нарушению кровообращения и, следовательно, функционального состояния цилиарного тела и трабекулярного аппарата [18]. На сегодняшний день многие зарубежные исследователи принимают во внимание сосудистый фактор в патогенезе глаукомы [19-21]. Согласно биомеханической теории В.В. Волкова в ос-



нове развития глаукомы лежит разница между внутричерепным давлением, давлением в межоболочечных пространствах зрительного нерва и ВГД [22]. Артериальная гипотензия приводит к снижению ликворного и тканевого давления в зрительном нерве, вследствие чего происходит прогиб решетчатой пластинки склеры со сдавлением пучков аксонов ганглиозных клеток сетчатки, нарушением аксонального транспорта и последующей гибелью аксонов. Низкое системное артериальное давление также может приводить к снижению перфузионного давления, составляющего разницу между давлением в артериальной системе глазного яблока и внутриглазным давлением, что ведет к уменьшению кровоснабжения зрительного нерва и ишемии аксонов ганглиозных клеток сетчатки [23]. Эта тема требует дальнейшего изучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение внутриглазного давления за счет уменьшения скорости продукции внутриглазной жидкости после вращения добровольцев в режиме 3 с наибольшим уровнем перегрузок, а также снижение конечной диастолической скорости кровотока во внутренней сонной артерии после вращения в режиме 2, повышение скорости кровотока в глазной артерии после вращения в режиме 3 входят в диапазон нормальных значений. Зрительная система обладает широкими возможностями функциональной адаптации в условиях действия экспериментальных режимов искусственной гравитации. При этом ЦКР зарекомендовала себя как безопасная для органа зрения установка, которая потенциально может применяться на борту космической станции как средство создания искусственной силы тяжести с целью предупреждения нежелательных явлений, связанных с нахождением в космосе.

Состояние внутриглазной гемодинамики неразрывно связано с уровнем ВГД.

С учетом полученных результатов актуальными методами оценки состояния органа зрения в условиях гипергравитации будут являться тонометрия, тонография, цветное доплеровское картирование сосудов глаза и орбиты, ультразвуковая доплерография сонных артерий, компьютерная периметрия, оптическая когерентная томография в ангиорежиме.

Коллектив авторов выражает благодарность руководителю исследовательской группы отдела психофизиологии деятельности операторов ГНЦ РФ – ИМБП РАН, д.м.н. О.М. Манько, а также поставщику медицинского оборудования – компании Stormoff (Россия) за бесплатное предоставление офтальмологической аппаратуры на время проведения настоящего исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров И.А., Воронков Ю.И. Влияние длительной микрогравитации на орган зрения. Обзор литературы. Офтальмология. 2016;13(2): 74-82. [Makarov I.A., Voronkov Y.I. Changes of the eye during long-term spaceflight. Review. Ophthalmology in Russia. 2016;13(2): 74-82. (In Russ.)] Available from: doi.org/10.18008/1816-5095-2016-2-74-82.
2. Gilles C. Fundamentals of Space medicine. New York, Springer; 2011. Available from: doi.org/10.1007/978-1-4419-9905-4.
3. Mader T.H., Gibson C.R., Pass A.F. Optic Disc Edema, Globe Flattening, Choroidal Folds, and Hyperopic Shifts Observed in Astronauts after Long-duration Space Flight. Ophthalmology. 2011;118(10): 2058-2069. Available from: doi.org/10.1016/j.ophtha.2011.06.021 PMID: 21849212.
4. Mader T.H., Gibson C.R., Otto C.A. et al. Persistent asymmetric optic disc swelling after long-duration space flight: Implications for pathogenesis. Journal of Neuro-Ophthalmology. 2017;37(2): 133-139. Available from: doi.org/10.1097/WNO.0000000000000467.
5. Mader T.H., Gibson C.R., Pass A.F. et al. Optic disc edema in an astronaut after repeat long-duration space flight. Journal of Neuro-Ophthalmology. 2013;33(3): 249-255. Available from: doi.org/10.1097/WNO.0b013e31829b41a6.
6. Alperin N., Bagci A.M. Spaceflight-induced visual impairment and globe deformations in astronauts are linked to orbital cerebrospinal fluid volume increase. Intracranial Pressure & Neuromonitoring XVI. Springer, Cham, 2018. Available from: doi.org/10.1007/978-3-319-65798-1\_44.
7. Patel N.B., Pass A.F., Mason S.S. et al. Optical coherence tomography analysis of the optic nerve head and surrounding structures in long-duration International Space Station astronauts. JAMA

Ophthalmology. 2018;136(2): 193-200. Available from: doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2017.6226.

8. Nelson E.S., Mulugeta L., Myers J.S. Microgravity-induced fluid shift and ophthalmic changes (review). Life. 2014;4(4): 621-665. Available from: doi.org/10.3390/life4040621.

9. Draeger J., Schwartz R., Groenhoff S., Stern C. Self-tonometry under microgravity conditions. Clin. Invest. 1993;71(9): 700-703.

10. Berdahl J.P., Yu D.Y., Morgan W.M. The translamellar pressure gradient in sustained zero gravity, idiopathic intracranial hypertension, and glaucoma. Medicine Hypotheses. 2012;79(5): 719-724. Available from: doi.org/10.1016/j.mehy.2012.08.009.

11. Keith F.M., Mader T.H. Ophthalmic concerns. Barratt M. L., Pool S. M. (eds). Principles of Clinical Medicine for Space Flight. NY: Springer, 2008.

12. Westfall A.C., Ng J.D., Samples J.R., Weissman J.L. In reply to Brodsky M.C. Flattening of the posterior sclera: hypotony or elevated intracranial pressure? Am. J. Ophthalmol. 2004;138: 511-512. Available from: doi.org/10.1016/j.jajo.2004.05.020.

13. Costa V.P., Arcieri E.S. Hypotony maculopathy. Acta Ophthalmol. 2007;85: 586-597. Available from: doi.org/10.1007/s40123-015-0037-z.

14. Вит В.В. Строение зрительной системы человека. Одесса: Астропринт, 2003. [Vit V.V. Stroenie zritelnoy sistemy cheloveka. Astroprint; 2003. (In Russ.)]

15. Котельников Г.П., Яшков А.В., Котельников М.Г. Гравитационная терапия. М.: Наука в России. 2007;5: 44. [Kotelnikov G.P., Yashkov A.V., Kotelnikov M.G. Gravitacionnaya terapiya. Nauka v Rossii. 2007;5: 44. (In Russ.)]

16. Пшеницына Е.С. Инновационные методы в комплексном лечении открытоугольной глаукомы. Вестник ОГУ. 2010;12: 201-202. [Pshenicyna E.S. Innovacionnyye metody v kompleksnom lechenii otkrytougolnoj glaukomy. Vestnik OGU. 2010;12: 201-202. (In Russ.)]

17. Пшеницына Е.С. Комплексное воздействие гравитационной терапии на обменные процессы в глазном яблоке. Вестник ОГУ. 2011;14(133): 316-318. [Pshenicyna E.S. Kompleksnoe vozdejstvie gravitacionnoj terapii na obmennye processy v glaznom yabloke. Vestnik OGU. 2011;14(133): 316-318. (In Russ.)]

18. Агафонова В.В., Франковская-Герлак М.З., Соколовская Т.В. и др. Частота и характер кардио-оваскулярной патологии у больных с псевдоэкзофталмативной глаукомой. Вестник офтальмологии. 2013;129(6): 34-37. [Agafonova V.V., Frankovska-Gerlak M.Z., Sokolovskaya T.V. et al. CHastota i harakter kardiovaskulyarnoy patologii u bol'nyh s psevdoeksofталmативnoj glaukomoj. Vestnik oftal'mologii. 2013;129(6): 34-37. (In Russ.)]

19. Yanagi M., Kawasaki K., Wang J.J. et al. Vascular risk factors in glaucoma: a review. Clin Experiment Ophthalmol. 2011;39(3): 252-258. Available from: doi.org/10.1111/j.1442-9071.2010.02455.x.

20. Leske M.C. Ocular perfusion pressure and glaucoma: clinical trial and epidemiologic findings. Curr Opin Ophthalmol. 2009;20(2): 73-78. Available from: doi.org/10.1097/ICU.0b013e3182831cef82.

21. Grieshaber M.C., Flammer J. Blood flow in glaucoma. Curr Opin Ophthalmol. 2005;16(2): 79-83. Available from: doi.org/10.1097/01.icu.0000156134.38495.0b.

22. Волков В.В. Глаукома при псевдонормальном давлении: Руководство для врачей. М.: Медицина. 2001. [Volkov V.V. Glaukoma pri psevdonormalnom davlenii. Rukovodstvo dlya vrachei. M.: Medicina. 2001. (In Russ.)]

23. Costa V.P., Harris A., Anderson D. et al. Ocular perfusion pressure in glaucoma. Acta Ophthalmologica. 2014;92(4): 252-266. Available from: doi.org/10.1111/aos.12298.

Поступила 21.04.2019 г.