

Определение особенностей строения глаз с аметропиями высоких степеней методом математического моделирования

Ю.В. Григорьева ✉, А.А. Петухова, У.А. Ятаев, С.Ю. Копяев, А.Н. Бессарабов, Д.Г. Узунян

Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия

Аннотация. Цель. Определение особенностей строения гиперметропического и миопического глаза на основании ретроспективного анализа, проспективного исследования и математического моделирования. **Материал и методы.** В ходе ретроспективного исследования были сформированы 2 группы: группа 1 – «Гиперметропия высокой степени», передне-задней осью (ПЗО) глаза менее 22 мм ($n = 20543$ глаз), группа 2 – «Миопия высокой степени», ПЗО глаза более 27 мм ($n = 16718$ глаз). Из электронной базы медицинской информационной системы (БМИС) были получены данные визометрии – некорригированная острота зрения (НКОЗ) и корригированная острота зрения (КОЗ), авторефрактометрии, тонометрии, оптической биометрии глаза, оптической когерентной томографии, расчета оптической силы ИОЛ, а также информация о сопутствующих хирургических вмешательствах. В ходе проспективного исследования было сформировано 2 группы: 1-я группа – 35 глаз с величиной ПЗО от 15,41 мм до 22,29 мм; 2-я группа – 34 глаза с ПЗО от 27,13 до 33,39 мм. **Результаты.** С помощью расчетов были выявлены отличия, характерные для гиперметропии и миопии высоких степеней. С помощью результатов дополнительных методов диагностики были построены модели глаз с гиперметропией и миопией высокой степени с учетом анатомических особенностей.

Ключевые слова: гиперметропия высокой степени, миопия высокой степени, оптическая биометрия, оптическая когерентная томография, ультразвуковая биомикроскопия, магнитно-резонансная томография, модель глаза

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

Determination of structural features of eyes with high degrees of ametropia by the method of mathematical modeling

Yu.V. Grigorieva ✉, A.A. Petukhova, U.A. Yataev, S.Yu. Kopyayev, A.N. Bessarabov, J.G. Uzunyan

Intersectoral Scientific and Technical Complex "Eye Microsurgery" named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia

Abstract. Purpose: Determination of the characteristics of the hypermetropic and myopic eye based on retrospective analysis, prospective study and mathematical modeling. **Material and methods:** In the course of a retrospective study 2 groups were formed: group 1 – "High degree hyperopia", anterior-posterior length (APL) of the eye less than 22 mm ($n = 20543$ eyes), group 2 – "High degree myopia", APL of the eye more than 27 mm ($n = 16718$ eyes). The following data were obtained from the electronic database of medical records: visometry – uncorrected visual acuity (UCVA) and corrected visual acuity (CVA), autorefractometry data, tonometry, optical biometry of the eye, optical coherence tomography, optical power of the IOL, accompanying surgical interventions. During the prospective study 2 groups were formed: Group 1 – 35 eyes with axial length from 15.41 mm to 22.29 mm, Group 2 – 34 eyes with axial length from 27.13 to 33.39 mm. **Conclusion:** The calculations revealed differences characteristic of high-degree hyperopia and myopia. Using the results of additional diagnostic methods, models of eyes with high-degree hyperopia and myopia were constructed, taking into account anatomical features.

Keywords: high hyperopia, high myopia, optical biometry, optical coherence tomography, ultrasound biomicroscopy, magnetic resonance imaging, eye model

Орган зрения – это сложная биологическая система. Еще с давних времен ученые проявляли интерес к изучению строения человеческого глаза, среди которых Гален был одним из первых, кто представил свою работу по данной тематике. В дальнейшем, по мере развития науки, представления об анатомии глаза и его функционировании претерпевали существенные изменения. Листинг (1851) предложил первую численную модель контура глаза со сферическими преломляющими поверхностями, разделяющими однородные среды с постоянными показателями преломления. В последующие

столетия было предложено множество моделей, описывающих оптическую систему глаза [1].

Одной из работ, посвященных подробному изучению оптической системы глаза, является исследование Тахчиди Х.П. с соавторами, где были представлены схематический стандартный глаз МИКОФ, где медиана длины глаза составила 23,96 (Min 18,04, Max 34,66), кератометрия – 43,64 (Min 38,25, Max 49,75), глубина передней камеры – 3,43 (Min 2,26, Max 4,60), толщина хрусталика – 4,18 (Min 3,07, Max 5,29), схематический стандартный глаз МИКОФ при гиперметропии

и миопии различных степеней, а также их расчетные параметры оптической системы (рефракция хрусталика, физическая рефракция, узловые точки, фокусные расстояния) [1, 2]. Кроме того, авторами были представлены средние значения клинической рефракции и анатомо-оптических параметров по встречаемости при различных сочетаниях длины глаза и оптической силы роговицы. Так, например, увеличение толщины хрусталика коррелировало с увеличением передне-задней оси глаза и было обратно пропорционально оптической силе роговицы [2].

Безусловно, миопические и гиперметропические глаза имеют анатомические особенности. Стоит отметить, что и характер помутнений хрусталика у данных категорий пациентов имеет ряд различий.

Так, в миопических глазах катаракта встречается в 4–5 раз чаще, чем при эмметропии или гиперметропии, что объясняется более выраженными нарушениями метаболических процессов в глазу, которые являются триггером для развития катаракты [3]. Более того, у лиц с ядерной и заднекапсулярной катарактой наблюдалась более высокая распространенность миопии, чем гиперметропии [4]. Степень миопии коррелирует с выраженностью помутнений в ядре хрусталика. Авторы работы также отмечают высокий процент гиперметропии у пациентов с кортикальной катарактой [4].

Таким образом, в литературе встречаются исследования, отражающие особенности строения глаза при различных рефракциях, однако эти работы немногочисленны и в полной мере не дают представление об анатомии глаз с экстремальными значениями передне-задней оси (ПЗО) глаза. Математическое моделирование может позволить представить характеристики глаза с миопией и гиперметропией высоких степеней.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение особенностей строения гиперметропического и миопического глаза на основании ретроспективного анализа, проспективного исследования и математического моделирования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная работа представляет собой ретроспективный анализ и проспективное исследование, выполненные на базе ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова за период с 2007 по 2024 год. В исследовании включено 37261 пациент с длиной глаза менее 22 мм и более 27 мм, которым была проведена факоэмульсификация катаракты с имплантацией интраокулярной линзы (ИОЛ), что составило 7 и 6 % соответственно от общего число прооперированных за данный период (рис. 1).

Распределение осевой длины глаза у пациентов катарактального профиля (2007-2024 гг)

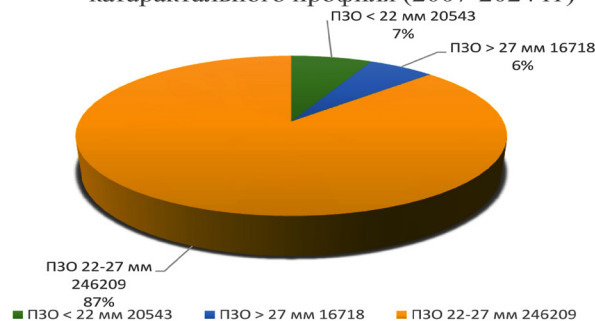


Рис. 1. Распределение ПЗО глаза у пациентов катарактального профиля (2007–2024 гг.)

Были сформированы 2 группы: группа 1 – «Гиперметропия высокой степени (ГВС)», с диагнозом «Осложненная катаракта. ГВС», передне-задней длиной глаза менее 22 мм (n = 20 543 глаз), группа 2 – «Миопия высокой степени (МВС)», с диагнозом «Осложненная катаракта. МВС», передне-задней длиной глаза более 27 мм (n = 16 718 глаз). Из электронной базы медицинской информационной системы (БМИС) были получены данные визометрии – некорригированная острота зрения (НКОЗ) и корригированная острота зрения (КОЗ), авторефрактометрии, тонометрии, оптической биометрии глаза, оптической когерентной томографии, расчета оптической силы ИОЛ, а также информация о сопутствующих хирургических вмешательствах (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная характеристика параметров у пациентов с гиперметропией и миопией высокой степени

Параметр	ГВС (n = 20543)			МВС (n = 16718)		
	M ± σ	min	max	M ± σ	min	max
НКОЗ	0,13 ± 0,15	0,001	1	0,04 ± 0,08	0	1
МКОЗ	0,28 ± 0,28	0,001	1	0,27 ± 0,25	0,002	1
Сферозэквивалент, дптр	0,6 ± 3,2	-19,5	19	-7,9 ± 6,7	-23,00	1
ВГД, мм рт. ст.	15,9 ± 4,1	6	39	16,9 ± 4,5	6	39
Оптическая биометрия ПЗО, мм	21,4 ± 0,6	16,02	22	29,0 ± 1,9	27	41,98
Глубина передней камеры, мм	2,7 ± 0,5	1,56	6,89	3,4 ± 0,6	1,69	6,63
Толщина хрусталика, мм	4,7 ± 0,5	2,51	6,75	4,5 ± 0,4	2,53	6,64
Оптическая сила ИОЛ, дптр	26,0 ± 2,8	19	40	9,6 ± 5,1	-10	21

Для построения моделей глаз были использованы средние значения, полученные при помощи ретроспективного анализа, представленные в табл. 2.

Расчеты выполнены в Excel с использованием встроенных функций PI, SQRT и формул, представленных ниже:

- объем роговицы (V_1) – формула усеченного конуса с учетом кривизны и диаметра;
- объем передней камеры (V_2) – рассчитан как цилиндр с поправкой на глубину;
- объем хрусталика (V_4) – вычислен сфероидами с использованием параметров толщины и диаметра;

- объем цилиарного тела (V_5) – рассчитан как кольцевой цилиндр между лимбом и капсулой хрусталика по формуле;

- объем стекловидного тела (V_6) – рассчитан по форме эллипсоидной модели;

- объем сосудистой оболочки (V_7) – рассчитан по формуле, которая рассматривает сосудистую оболочку как сферический слой за вычетом зоны крепления к цилиарному телу;

- объем сетчатки (V_8) – моделирован как внешняя оболочка с вычетом области роговицы;

- объем склеры (V_9) – моделирован как внешняя оболочка с вычетом области роговицы.

Таблица 2

Комплекс морфометрических данных для выполнения математического моделирования таблицы

Параметр	ГВС	МВС
Оптическая сила передней поверхности роговицы, дптр	43,00	44,94
Оптическая сила задней поверхности роговицы, дптр	43,50	47,23
Радиус кривизны передней поверхности роговицы, мм	7,85	7,51
Радиус кривизны задней поверхности роговицы, мм	7,76	7,15
Толщина роговицы на 6 ч, мм	0,7	0,5
Толщина роговицы в центре, мм	0,5	0,7
Толщина роговицы на 12 ч, мм	0,7	13,9
Диаметр лимба (WTW), мм	13,65	13,90
Глубина ПК в центре, мм	2,52	3,50
Глубина ПК на 6 ч, мм	1,08	1,60
Глубина ПК на 12 ч, мм	1,05	1,70
Угол ПК, градусы	0 (закрыт)	39,21
Диаметр угла передней камеры (УПК), мм	11,97	11,84
Глубина задней камеры на 6 ч, мм	0,65	0,76
Глубина задней камеры на 12 ч, мм	0,62	0,76
Толщина хрусталика, мм	4,7	4,48
Длина цинновых связок, мм	0,46	1,92
Толщина цилиарного тела, мм	0,63	0,55
Диаметр капсульного мешка, мм	9,55	8,50
ПЗО глаза, мм	21,40	29,90
Толщина сетчатки в фовеа, мм	0,2	0,18
Толщина сетчатки в парафовеа, мм	0,3	0,25
Толщина сетчатки на периферии, мм	0,25	0,2
Толщина хориоидеи в фовеа, мм	0,4	0,1
Толщина хориоидеи в парафовеа, мм	0,45	0,12
Толщина хориоидеи на периферии, мм	0,3	0,1
Толщина склеры у ДЗН, мм	1,6	0,5
Толщина склеры у экватора, мм	1,5	0,4

Площади структур глаза вычислены через интегральные методы для сложных криволинейных параметров.

Также на базе ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова проводили клинические исследования в период с 2022

по 2025 г., которые базировались на анализе клинко-функционального состояния глаз с МВС и ГВС.

Первую группу, с осевой гиперметропической рефракцией, составили 35 пациентов (35 глаз) с величиной

ПЗО от 15,41 до 22,29 мм с медианой 21,18 мм. Ко 2-й группе, с миопической рефракцией, были отнесены 34 пациента (34 глаза) с величиной ПЗО глаза от 27,13 до 33,39 мм с медианой 28,9 мм (табл. 3).

Таблица 3

Распределение пациентов по возрасту полу в 1-й и 2-й группах проспективного исследования

Показатель	Гиперметропия		Миопия	
	абс.	%	абс.	%
Всего глаз	35	100,0	34	100,0
Всего человек	35	100,0	34	100,0
Мужчин	16	45,7	14	41,2
Женщин	19	54,3	20	58,8
Возраст, лет Медиана (Ме)	53 (40; 71) Min-Max: 20-93		58 (52,5; 69) Min-Max: 39-76	

Каждому пациенту были выполнены ультразвуковая биомикроскопия (УБМ), оптическая когерентная томография (ОКТ), магнитно-резонансная томография (МРТ). Последнее исследование выполняли с целью выбора метода анестезии при подготовке к хирургии катаракты. Данные обследования выполнялись с целью разработки методики компьютерного моделирования, объединяющие данные современных методов визуализации.

Обработанные данные послойно совмещали в программе Adobe Photoshop с учетом анатомических ориентиров:

1. На основе МРТ создавали базовый контур глазного яблока.

2. Данные УБМ использовали для детального расположения роговицы, радужки, хрусталика со связочным аппаратом и цилиарного тела.

3. Данные ОКТ позволили воспроизвести рельеф глазного дна с особенностями анатомии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В результате вычислений были получены следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные параметры площадей и объемов структур

Параметр	ГВС	МВС
Объем, мм ³		
- роговицы V1, мм ³	196,82	275,20
- передней камеры V2	133,07	238,22
- задней камеры V3	14,81	53,20
- хрусталика V4	181,92	138,88
- цилиарного тела V5	42,16	36,56
- стекловидного тела V6	3739,80	11628,10
- сосудистой оболочки V7	0,26	0,17
- сетчатки V8	0,15	0,27
- склеры V9	1,34	0,70
Площадь, мм ²		
- передней поверхности роговицы S1	197,11	230,75
- задней поверхности роговицы S2	114,26	128,73
- радужки S3	105,46	103,03
- капсулы хрусталика S4	177,96	145,02
- сосудистой оболочки S5	864,04	1705,86
- сетчатки S6	595,46	1348,16
- склеры S7	895,47	1749,77

Полученные результаты демонстрируют, что площади передней поверхности роговицы в группах 1 и 2 статистически значимо различаются (230,75 мм² при МВС, 197,11 мм² при ГВС, $p < 0,05$), что можно объяснить большой кривизной роговицы у миопов (группа 2 – К 44,94 дптр, группа 1 – К 43,00 дптр).

Задняя поверхность роговицы демонстрирует меньший разброс значений в группах 1 и 2 (114,26 и 128,73 мм² соответственно), что коррелирует с ее анатомической стабильностью.

Обнаружено, что площадь радужки не имеет значимых различий между группами (105,46 и 103,03 мм²), что свидетельствует об отсутствии влияния аномалий рефракций на морфологию данной структуры глаза.

В группе МВС площадь капсулы снижена по сравнению с группой ГВС, что коррелирует с меньшей толщиной хрусталика у миопов.

Площади сосудистой оболочки, сетчатки и склеры достоверно больше при миопии (на 97,4; 126,4 и 95,4 % соответственно, $p < 0,01$). Последнее

обусловлено перерастяжением глазного яблока по ПЗО у МВС (29,9 и 21,4 мм в группах 2 и 1 соответственно). Увеличение площади сетчатки при миопии (1348,16 мм²) на фоне ее истончения (0,28 и 0,20 мм) подтверждает теорию напряжения, ведущего к периферическим дистрофиям [5].

Более того, стоит отметить, что чрезмерное удлинение глазного яблока у пациентов с МВС, а также более малые значения толщины склеры могут быть связаны с ремоделированием внеклеточного матрикса склеры.

Этот процесс характеризуется снижением содержания коллагена, является основной причиной снижения эластичности в миопических глазах, что в конечном итоге приводит к снижению сопротивления склеры, растяжению, вызванному внутриглазным давлением [6].

Таким образом, расчетные параметры, а также изображения, полученные методами МРТ, УБМ, ОКТ позволили нам составить модель глаза при миопии и гиперметропии высоких степеней (рис. 2).

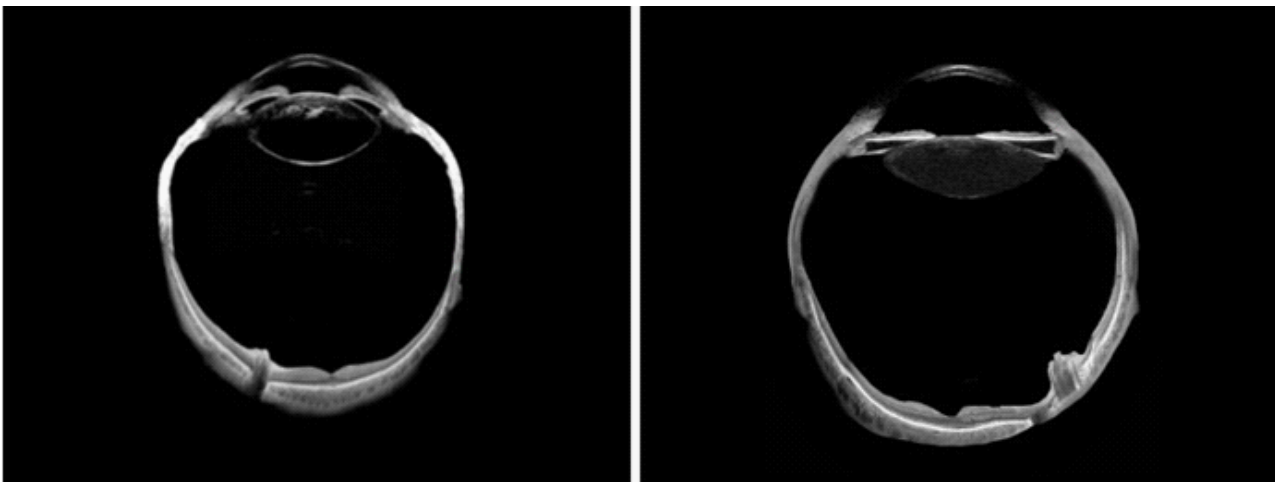


Рис. 2. Модели глаз с ГВС и МВС

Представленные модели наглядно демонстрируют, что различия между ГВС и МВС не ограничиваются лишь длиной ПЗО, но включают комплекс структурных изменений, влияющих на проведение хирургических манипуляций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа иллюстрирует наличие статистически значимых различий в анатомии глазного яблока между пациентами, имеющими высокие степени гиперметропии и миопии.

Полученные в ходе ретроспективного анализа и подтвержденные математическим моделированием данные обосновывают требование к разработке индивидуальных хирургических стратегий при удалении катаракты у указанных групп пациентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тахчиди Х.П., Бессарабов А.Н., Пантелеев Е.Н. Параметризованный схематический стандартный глаз для решения вычислительных задач офтальмологии (I часть). *Офтальмохирургия*. 2006;4:57–63.
2. Тахчиди Х.П., Бессарабов А.Н., Пантелеев Е.Н. Параметризованный схематический стандартный глаз для решения вычислительных задач офтальмологии (II часть). *Офтальмохирургия*. 2007;1:59–68.
3. Еричев В.П., Филиппова О.М. Особенности рефракции у пациентов с сочетанной патологией: глаукома, катаракта, миопия. *РМЖ*. 2003;4(2):42–44.
4. Hashemi H., Khabazkhoob M., Mirafteb M., Mohammad K., Fotouhi A. The association between refractive errors and cataract: the tehran eye study. *Middle East African Journal of Ophthalmology*. 2011;18(2):154–158. doi: 10.4103/0974-9233.80705.

5. David T., Smye S.O., James T., Dabbs T. Time-dependent stress and displacement of the eye wall tissue of the human eye. *Medical Engineering and Physics*. 1997;19(2): 131–9. doi: 10.1016/s1350-4533(96)00052-5.

6. Liu X., Yuan Y., Wu Y., Zhu C., Liu Y., Ke B. Extracellular Matrix Stiffness Modulates Myopia Scleral Remodeling Through Integrin/F-Actin/YAP Axis. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 2025.3;66(2):22. doi: 10.1167/iovs.66.2.22.

REFERENCES

1. Takhchidi H.P., And Bessarabov.N., Pantelev E.N. Parameterized schematic standard eye for solving computational problems of ophthalmology (part I). *Oftal'mokhirurgiya = Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2006;4:57–63. (In Russ.).

2. Takhchidi H.P., And Bessarabov.N., Pantelev E.N. Parameterized schematic standard eye for solving computational problems of ophthalmology also (II part). *Oftal'mokhirurgiya = Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2007;1:59–68. (In Russ.).

3. Erichev V.P., Filippova O.M. Refractive peculiarities in patients with combined pathology: glaucoma, cataract and myopia. *Russian Medical Journal*. 2003;4(2):42–44. (In Russ.).

4. Hashemi H., Khabazkhoob M., MirafTAB M., Mohammad K., Fotouhi A. The association between refractive errors and cataract: the tehran eye study. *Middle East African Journal of Ophthalmology*. 2011;18(2):154–158. doi: 10.4103/0974-9233.80705.

5. David T., Smye S.O., James T., Dabbs T. Time-dependent stress and displacement of the eye wall tissue of the human eye. *Medical Engineering and Physics*. 1997;19(2): 131–9. doi: 10.1016/s1350-4533(96)00052-5.

6. Liu X., Yuan Y., Wu Y., Zhu C., Liu Y., Ke B. Extracellular Matrix Stiffness Modulates Myopia Scleral Remodeling Through Integrin/F-Actin/YAP Axis. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 2025.3;66(2):22. doi: 10.1167/iovs.66.2.22.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Этические требования соблюдены. Текст не сгенерирован нейросетью.

Информация об авторах

Юлия Валериевна Григорьева – аспирант отдела хирургии хрусталика и интраокулярной коррекции, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; ✉ prostoboss2202@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5075-0772>

Алена Алексеевна Петухова – аспирант отдела хирургии хрусталика и интраокулярной коррекции, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; alyona1944@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6829-0855>

Умар Ахмедович Ятаев – врач-ординатор, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; yataevumar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5693-1953>

Сергей Юрьевич Копяев – доктор медицинских наук, заведующий отделом лазерной рефракционной хирургии, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; kopyaevsu@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-5085-6788>

Анатолий Никитич Бессарабов – кандидат технических наук, заведующий отделом научно-математического обеспечения, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; a.n.bessarabov@mntk.ru

Джюзетта Григорьевна Узунян – кандидат медицинских наук, заведующая отделением клинико-функциональной диагностики, Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова, Москва, Россия; u_dzhulietta@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5203-2384>

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 19.08.2025; принята к публикации 20.08.2025.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Ethical requirements are met. The text is not generated by a neural network.

Information about the authors

Yulia V. Grigorieva – Postgraduate student of the Department of Lens Surgery and Intraocular Correction, Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery” named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia; ✉ prostoboss2202@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5075-0772>

Alyona A. Petukhova – Postgraduate student of the Department of Lens Surgery and Intraocular Correction, Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery” named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia; alyona1944@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6829-0855>

Umar A. Yataev – Resident Physician, Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery” named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia; yataevumar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5693-1953>

Sergei Yu. Kopyaev – MD, Head of the Department of Laser Refractive Surgery, Academician S.N. Fedorov Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery”, Moscow, Russia; kopyaevsu@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-5085-6788>

Anatoly N. Bessarabov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Scientific and Mathematical Support, Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery” named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia; a.n.bessarabov@mntk.ru

Juliet G. Uzunyan – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Clinical and Functional Diagnostics, Interdisciplinary Scientific and Technical Complex “Eye Microsurgery” named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia; u_dzhulietta@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5203-2384>

The article was submitted 30.06.2025; approved after reviewing 19.08.2025; accepted for publication 20.08.2025.