

Алгоритм расчета диоптрийной силы оптического цилиндра для проведения оптического этапа кератопротезирования



А.В. Головин



В.Р. Манцова



А.А. Трошина



Е.В. Кечин



А.В. Прошко

ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова)
Министерства здравоохранения Российской Федерации
Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2025;22(4):786–794

Цель: провести анализ клинико-функциональных результатов оптического этапа кератопротезирования и разработать модель машинного обучения для расчета силы оптического цилиндра кератопротеза. **Пациенты и методы.** Проведено хирургическое лечение 90 пациентов (90 глаз) с ожоговыми и терминальными дистрофическими бельмами роговицы. Средний возраст больных составил 59,5 (40,75; 70,5) года; 65 мужчин и 25 женщин. Всем пациентам в 2 этапа было проведено кератопротезирование, в ходе которого на первом этапе была имплантирована опорная пластина кератопротеза в толщу сосудистого бельма или в виде кератопротезного комплекса после предварительной имплантации опорной пластины в криоконсервированную роговицу донора, а вторым этапом вкручен оптический цилиндр, который подбирался из расчета длины глазного яблока, наличия или отсутствия нативного хрусталика / интраокулярной линзы (ИОЛ) / иридохрусталиковой диафрагмы (ИХД), общей толщины сосудистого бельма и толщины покровных аутоотканей после укрепляющих операций в анамнезе. **Результаты.** Учитывая полученные результаты по метрикам качества (MAE и R^2) и полученной предсказуемости в пределах $\pm 0,50$ дптр в 30,0 % случаев и $\pm 1,00$ дптр в 50 % случаев на тестовой выборке, принято решение разработать модель на основании двух признаков: длины глаза и общей толщины бельма. Модель с двумя признаками показала лучшее качество, чем модель с одним признаком, на тестовой выборке по всем метрикам качества (MAE и R^2) и полученной предсказуемости в пределах $\pm 0,50$ и $\pm 1,00$ дптр, которые составили 30,0 и 70,0 % соответственно. **Заключение.** Разработана модель линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра кератопротеза на основании данных длины глаза и общей толщины бельма, которая показала предсказуемость в пределах $\pm 1,00$ дптр в 70,0 % случаев. Тем не менее необходимо проведение дальнейших наблюдений для усовершенствования данной модели.

Ключевые слова: кератопротезирование, оптический цилиндр кератопротеза, сосудистое бельмо

Для цитирования: Головин А.В., Манцова В.Р., Трошина А.А., Кечин Е.В., Прошко А.В. Алгоритм расчета диоптрийной силы оптического цилиндра для проведения оптического этапа кератопротезирования. *Офтальмология*. 2025;22(4):786–794. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-786-794>

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

Конфликт интересов отсутствует.



Algorithm for Calculating the Dioptric Power of an Optical Cylinder for the Optical Stage of Keratoprosthesis Implantation

A.V. Golovin, V.R. Mantsova, A.A. Troshina, E.V. Hechin, A.V. Proshko

S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution
Beskudnikovskiy Blvd., 59a, Moscow, 127486, Russia

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2025;22(4):786–794

Objective: to analyze the clinical and functional outcomes of the optical stage of keratoprosthesis implantation and to develop the machine learning model for calculating the optical cylinder power. **Patients and methods.** The study enrolled 90 patients (90 eyes) with burn injuries and terminal dystrophic corneal opacities who underwent the surgical treatment. The average age of the patients was 59.5 years (40.75; 70.5), of whom 65 were men and 25 were women. The patients underwent keratoprosthesis implantation in two stages. The first stage involved the implantation of the intralamellar plate into the corneal leucoma or corneal-prosthetic complex implantation. The second stage involved the implantation of the optical cylinder, which was selected considering axial length, total corneal leucoma thickness, the thickness of autograft covering and the presence or absence of the native lens/intraocular lens/lens-iris diaphragm. **Outcomes.** Considering the results for the quality metrics (MAE and R^2) and the achieved predictability within ± 0.50 D in 30.0 % of cases and ± 1.00 D in 50 % of cases on the test sample, it was decided to develop the model based on two features: axial length and total leucoma thickness. The model with two features demonstrated better quality than the model with one feature on the test sample across all quality metrics (MAE and R^2) and the predictability within ± 0.50 D and ± 1.00 D, which were 30.0 % and 70.0 % respectively. **Conclusion.** The linear regression model was developed to calculate the dioptric power of an optical cylinder based on the axial length and total leucoma thickness. It demonstrated predictability within ± 1.00 D in 70.0 % of cases. Further observations are required to improve the model.

Keywords: keratoprosthesis, optical cylinder, corneal leucoma

For citation: Golovin A.V., Mantsova V.R., Troshina A.A., Hechin E.V., Proshko A.V. Algorithm for Calculating the Dioptric Power of an Optical Cylinder for the Optical Stage of Keratoprosthesis Implantation. *Ophthalmology in Russia*. 2025;22(4):786–794. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-786-794>

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

There is no conflict of interests.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Хирургическое лечение пациентов с ожоговыми и терминальными дистрофическими бельмами роговицы является одним из актуальных вопросов современной офтальмологии. В большинстве случаев проведение сквозной кератопластики оказывается неэффективным в связи с помутнением и васкуляризацией трансплантата в послеоперационном периоде. На сегодняшний день единственным эффективным методом хирургического лечения данной группы пациентов является кератопротезирование [1].

За долгие годы развития кератопротезирования было предложено множество моделей кератопротезов, отличающихся друг от друга размером опорной пластины, формой, материалом, типом фиксации в роговице, диаметром и длиной оптического цилиндра, а также этапно-стью кератопротезирования [2]. Однако вопрос подбора диоптрийной силы оптического цилиндра остается актуальным и малоизученным, что связано с несколькими факторами: отсутствием большой выборки пациентов со стабильным зрительным результатом, частыми осложнениями кератопротезирования, которые требуют проведения дополнительных оптико-реконструктивно-пластических операций, влияющих на рефракцию, а также техническими сложностями в расчете и изготовлении индивидуального оптического цилиндра кератопротеза [3].

В Российской Федерации наиболее распространен кератопротез модели Федорова — Зуева, состоящий из титановой опорной пластины и оптического цилиндра из полиметилметакрилата (ПММА) диаметром 2,8 мм [4]. В классическом исполнении оптический цилиндр кератопротеза Федорова — Зуева содержит экстраокулярную часть, которая возвышается над поверхностью сосудистого бельма, и интраокулярную часть, расположенную интрастромально и частично в передней камере [5].

В настоящее время оптические цилиндры кератопротеза Федорова — Зуева подбирают с учетом следующих параметров: длина переднезадней оси (ПЗО) глаза, фактичность, этиология сосудистого бельма, хирургические вмешательства в анамнезе (укрепление бельма) [6].

Высота экстраокулярной части определяется по формуле, исходя из наличия в анамнезе операций, направленных на укрепление сосудистого бельма, что сопровождается увеличением общей толщины сосудистого бельма и изменением глубины залегания опорной пластины кератопротеза относительно передней поверхности глаза. Экстраокулярная часть диоптрийной силы не несет, в норме выстоит над поверхностью сосудистого бельма и препятствует зарастанию оптического цилиндра подлежащими тканями [7].

A.V. Golovin, V.R. Mantsova, A.A. Troshina, E.V. Hechin, A.V. Proshko

Contact information: Troshina Anna A. anna.troshina221B@yandex.ru

Algorithm for Calculating the Dioptric Power of an Optical Cylinder for the Optical Stage...

Интраокулярная часть оптического цилиндра подразделяется на 4 диоптрийности в зависимости от длины глазного яблока и наличия или отсутствия нативного хрусталика / ИОЛ / ИХД. В случае афакии при длине глаза 23 мм имплантируют оптический цилиндр 58 дптр, 24 мм — 55 дптр; в случае наличия нативного хрусталика / ИОЛ / ИХД при длине глаза 28 мм — 46 дптр, 26 мм — 48 дптр.

Ввиду ограниченного диоптрийного ряда оптических цилиндров кератопротеза одним из осложнений кератопротезирования в послеоперационном периоде являются различные виды аметропии [8]. Именно поэтому разработка алгоритма подбора диоптрийности индивидуального оптического цилиндра кератопротеза является одним из актуальных направлений современного кератопротезирования и требует изучения.

Цель: провести анализ клинико-функциональных результатов оптического этапа кератопротезирования и разработать модель машинного обучения для расчета преломляющей силы оптического цилиндра кератопротеза.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Проведено хирургическое лечение 90 пациентов (90 глаз) с ожоговыми и терминальными дистрофическими бельмами роговицы. Средний возраст больных составил 59,5 (40,75; 70,5) года; 65 мужчин и 25 женщин.

На дооперационном этапе всем пациентам была выполнена полная клинико-функциональная диагностика, включавшая сбор анамнеза, биомикроскопию, визометрию, периметрию, тонометрию, ЭФИ, А- и В-сканирование, оптическую когерентную томографию переднего отрезка глаза (ОКТ), ультразвуковую биомикроскопию (УБМ). Данное обследование проводили всем пациентам до кератопротезирования, после имплантации опорной пластины и перед проведением второго этапа кератопротезирования.

В процессе сбора анамнеза особое внимание уделялось этиологии бельма и истории предыдущих хирургических вмешательств (укрепление бельма аутоканьями, экстракция катаракты и др.). При проведении ОКТ переднего отрезка глаза учитывали общую толщину и равномерность бельма, а также толщину покровной ткани при наличии укрепления бельма в анамнезе. При проведении УБМ обращали внимание на наличие или отсутствие нативного хрусталика и ИОЛ/ИХД, их положение, состояние связочного аппарата. А-сканирование проводилось с целью определения длины ПЗО глаза.

На первом этапе всем пациентам была выполнена имплантация опорной пластины кератопротеза интрастромально в толщу сосудистого бельма или в составе роговично-протезного комплекса.

Перед следующим этапом кератопротезирования оценивали уровень ВГД пальпаторно, общую толщину сосудистого бельма, толщину бельма над опорной пластиной кератопротеза и под ней. Если удаление хрусталика планировалось во время второго этапа кератопротезирования, проводилось измерение его толщины и состояние связочного аппарата с помощью УБМ.

Вторым этапом всем пациентам минимум через 6 месяцев после имплантации опорной пластины кератопротеза был вкручен оптический цилиндр, подобранный с учетом следующих параметров глаза: ПЗО, наличие или отсутствие нативного хрусталика / ИОЛ / ИХД, укрепляющих операций в анамнезе и общей толщины сосудистого бельма.

Критериями исключения для проведения второго этапа кератопротезирования были острый воспалительный процесс, нарушения придаточного аппарата глаза (симблефарон, выворот, заворот век, выраженная рубцовая деформация век в сочетании с лагофтальмом и др.), наличие прогрессирующего истончения сосудистого бельма над опорной пластиной, протрузия кератопротеза, некомпенсированное повышение ВГД, грубые изменения сетчатки и зрительного нерва, серьезные соматические заболевания.

Всем пациентам выполнялось двухэтапное кератопротезирование с использованием опорных пластин кератопротеза Федорова — Зуева и его модифицированной модели совместно с Репер-НН. Параметры оптического цилиндра от опорной пластины не зависели и отличались общей длиной, высотой экстраокулярной части и диоптрийностью.

Оптический цилиндр кератопротеза выполнен из полиметилметакрилата и состоит из двух частей: экстра- и интраокулярной. Экстраокулярная часть оптического цилиндра расположена над поверхностью сосудистого бельма и препятствует зарастанию оптического цилиндра, имеет высоту: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм, что дает возможность индивидуального подбора оптического цилиндра исходя из толщины сосудистого бельма и наличия укрепляющих операций в анамнезе, а также позволяет выполнить замену оптического цилиндра, не прибегая к иссечению тканей вокруг цилиндра. Экстраокулярная часть диоптрийности не несет.

Интраокулярная часть, в свою очередь, подразделяется на резьбовую часть, которая после имплантации цилиндра расположена в строме роговицы, и безрезьбовую, расположенную в передней камере. Интраокулярная часть несет в себе основную диоптрийную нагрузку оптического цилиндра. В случае афакии возможна имплантация оптических цилиндров: 55 и 58 дптр, что коррелирует с длиной глаза 24 и 23 мм соответственно; при наличии нативного хрусталика ИОЛ или ИХД имплантируют оптические цилиндры 46 и 48 дптр, что коррелирует с длиной глаза 28 и 26 мм соответственно (рис. 1, 2).

После второго этапа кератопротезирования оценивали максимально скорректированную остроту зрения (МКОЗ) и полученную рефракцию.

Для проведения статистического анализа данные вносили в электронную таблицу Microsoft Excel 2010 («Microsoft»). Статистическую обработку данных проводили с использованием языка программирования Python 3, библиотек Pandas, SciPy и редактора кода Visual Studio Code («Microsoft»). Характер распределения данных оценивали

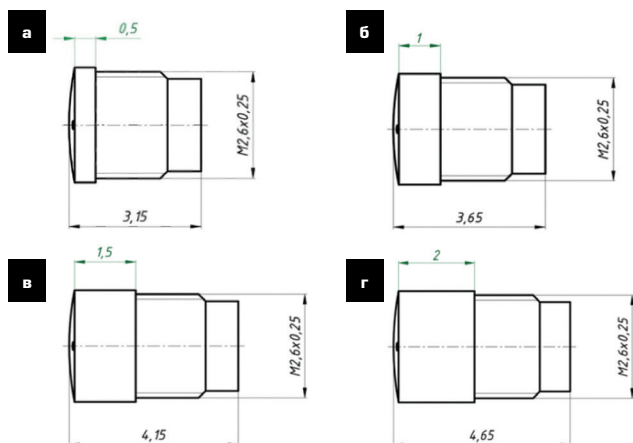


Рис. 1. Чертежи афакических оптических цилиндров: а — высота выстояния экстраокулярной части 0,5 мм; б — высота экстраокулярной части 1,0 мм; в — высота экстраокулярной части 1,5 мм; г — высота экстраокулярной части 2,0 мм

Fig. 1. Drawings of aphakic optical cylinders: а — 0.5 mm height; б — 1.0 mm height; в — 1.5 mm height; г — 2.0 mm height

с помощью критерия Шапиро — Уилка. Сравнение данных между группами проводили с использованием критерия Манна — Уитни, корреляционный анализ — с использованием критерия Спирмена, интерпретацию силы связи — по шкале Чеддока. Построение графиков осуществляли с использованием библиотек Seaborn и Matplotlib. Данные представлены в формате Me (Q1; Q3), где Me — медиана, Q1, Q3 — нижний и верхний квартили, а также в виде абсолютных значений и процентов, рассчитывали минимальное и максимальное значения (Min и Max соответственно). Сравнение категориальных данных выполняли с использованием критерия хи-квадрат с поправкой Йейтса и точного критерия Фишера. Статистически значимыми признавали



Рис. 2. Факичные оптические цилиндры (слева направо): с высотой экстраокулярной части 0,5 мм, с высотой экстраокулярной части 1,5 мм

Fig. 2. Phakic optical cylinders (left to right): 0.5 mm extraocular part, 1.5 mm extraocular part

различия, при которых уровень статистической значимости p менее 0,05 ($p < 0,05$).

Разработку моделей линейной регрессии проводили с использованием библиотек sklearn и Statsmodels. Целевой переменной была преломляющая сила оптического цилиндра кератопротеза. Для разработки моделей отобраны пациенты, у которых была достигнута рефракции в пределах $\pm 0,50$ дптр относительно эметропии. Весь набор данных был разделен на обучающий и тестовый в соотношении 70:30. Качество моделей оценивали по следующим метрикам: MAE — Mean Absolute Error (средняя абсолютная ошибка) и R^2 — коэффициент детерминации. Целевой метрикой приняли MAE.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблицах 1 и 2 представлена характеристика общей, обучающей и тестовой выборки, на основании которых разрабатывали модели для расчета преломляющей силы оптического цилиндра. Статистически значимой разницы между обучающей и тестовой выборками не выявлено ($p > 0,05$).

Таблица 1. Клинико-морфофункциональная характеристика количественных данных пациентов

Table 1. Clinical and morphofunctional characteristics of patients' quantitative data

Показатель Parameter	Общая выборка General sample $n = 32$			Обучающая выборка Train sample $n = 22$			Тестовая выборка Test sample $n = 10$			p -value*
	Me (Q1; Q3)	Min	Max	Me (Q1; Q3)	Min	Max	Me (Q1; Q3)	Min	Max	
Возраст, лет Age, years	59,5 (40,75; 70,5)	22,00	82,00	60,5 (52,25; 73,75)	22,00	82,00	40,5 (37,5; 63,0)	25,00	72,00	0,088
Длина глаза, мм Axial length, mm	23,73 (23,04; 23,86)	22,35	24,89	23,73 (22,98; 23,86)	22,35	24,65	23,63 (23,12; 23,96)	22,66	24,89	0,555
МКОЗ до, ед. BCVA before, units	0,01 (0,01; 0,01)	0,01	0,05	0,01 (0,01; 0,02)	0,01	0,05	0,01 (0,01; 0,01)	0,01	0,01	0,077
Высота цилиндра, мм Cylinder height, mm	1,0 (0,5; 1,5)	0,50	2,00	1,0 (0,62; 1,5)	0,50	2,00	0,75 (0,5; 1,5)	0,50	2,00	0,672
МКОЗ после, ед. BCVA after, units	0,4 (0,18; 0,7)	0,05	1,00	0,35 (0,1; 0,6)	0,05	1,00	0,55 (0,4; 0,88)	0,10	1,00	0,094
Толщина бельма, мкм Leucoma thickness, μ m	778,5 (633,25; 907,75)	583,00	1444,00	785,5 (644,75; 894,0)	583,00	1427,00	745,0 (623,75; 1194,25)	589,00	1444,00	0,776
Толщина хрусталика, мм Lens thickness, mm	4,7 (4,2; 4,89)	3,58	5,15	4,71 (4,54; 4,91)	3,96	5,15	4,59 (4,16; 4,76)	3,58	4,91	0,204
Полученная рефракция, дптр Refraction, D	0,0 (-0,5; 0,0)	-0,50	0,50	0,0 (-0,38; 0,5)	-0,50	0,50	-0,25 (-0,5; 0,0)	-0,50	0,00	0,067
Оптическая сила цилиндра, дптр Dioptric power of the optical cylinder, D	55,0 (55,0; 58,0)	46,00	58,00	56,5 (55,0; 58,0)	46,00	58,00	55,0 (55,0; 58,0)	46,00	58,00	0,553

Примечание: * критерий Манна — Уитни.
Note: * Mann — Whitney test.

Таблица 2. Клинико-морфофункциональная характеристика качественных данных пациентов

Table 2. Clinical and morphofunctional characteristics of patients' qualitative data

Показатель Parameter	Значение Value	Общий набор данных General dataset n = 32		Обучающий набор данных Train dataset n = 22		Тестовый набор данных Test dataset n = 10		p-value*
		абс. abs.	%	абс. abs.	%	абс. abs.	%	
Пол Sex	Мужской Males	22	68,8	16	72,7	6	60,0	0,683
	Женский Females	10	31,3	6	27,3	4	40,0	
Модель оптического цилиндра Optical cylinder model	Афакичный Aphakic	30	93,8	21	95,5	9	90,0	0,534
	Факичный Phakic	2	6,3	1	4,5	1	10,0	
Укрепления бельма до второго этапа кератопротезирования Autograft transplplantation before the second stage of keratoprosthesis implantation	Нет No	20	62,5	15	68,2	5	50,0	0,555**
	Да Yes	12	37,5	7	31,8	5	50,0	
Укрепление бельма после второго этапа кератопротезирования Autograft transplplantation after the second stage of keratoprosthesis implantation	Нет No	27	84,4	18	81,8	9	90,0	1,000
	Да Yes	5	15,6	4	18,2	1	10,0	
Модель кератопротеза Keratoprosthesis model	Репер HH Reper NN	19	59,4	13	59,1	6	60,0	1,000
	Федоров — Зуев Fyodorov-Zuev	13	40,6	9	40,9	4	40,0	

Примечание: * точный критерий Фишера, если не указано иное, ** критерий хи-квадрат с поправкой Йейтса.
Note: * Fisher's exact test, unless otherwise stated, ** Yate's chi-square test.

Таблица 3. Корреляция между преломляющей силой оптического цилиндра и параметрами глаз пациентов

Table 3. Correlation between the dioptric power of an optical cylinder and the parameters of patients' eyes

Показатель Parameter	r	p-value
Возраст Age	0,298	0,098
Толщина хрусталика Lens thickness	-0,019	0,919
МКОЗ до BCVA before	-0,035	0,848
Высота цилиндра Cylinder height	-0,073	0,691
Полученная рефракция Refraction	-0,140	0,443
Толщина бельма Leucoma thickness	-0,163	0,371
Длина глаза Axial length	-0,685	<0,001

Примечание: r — коэффициент корреляции Спирмена.
Note: r — Spearman rank correlation.

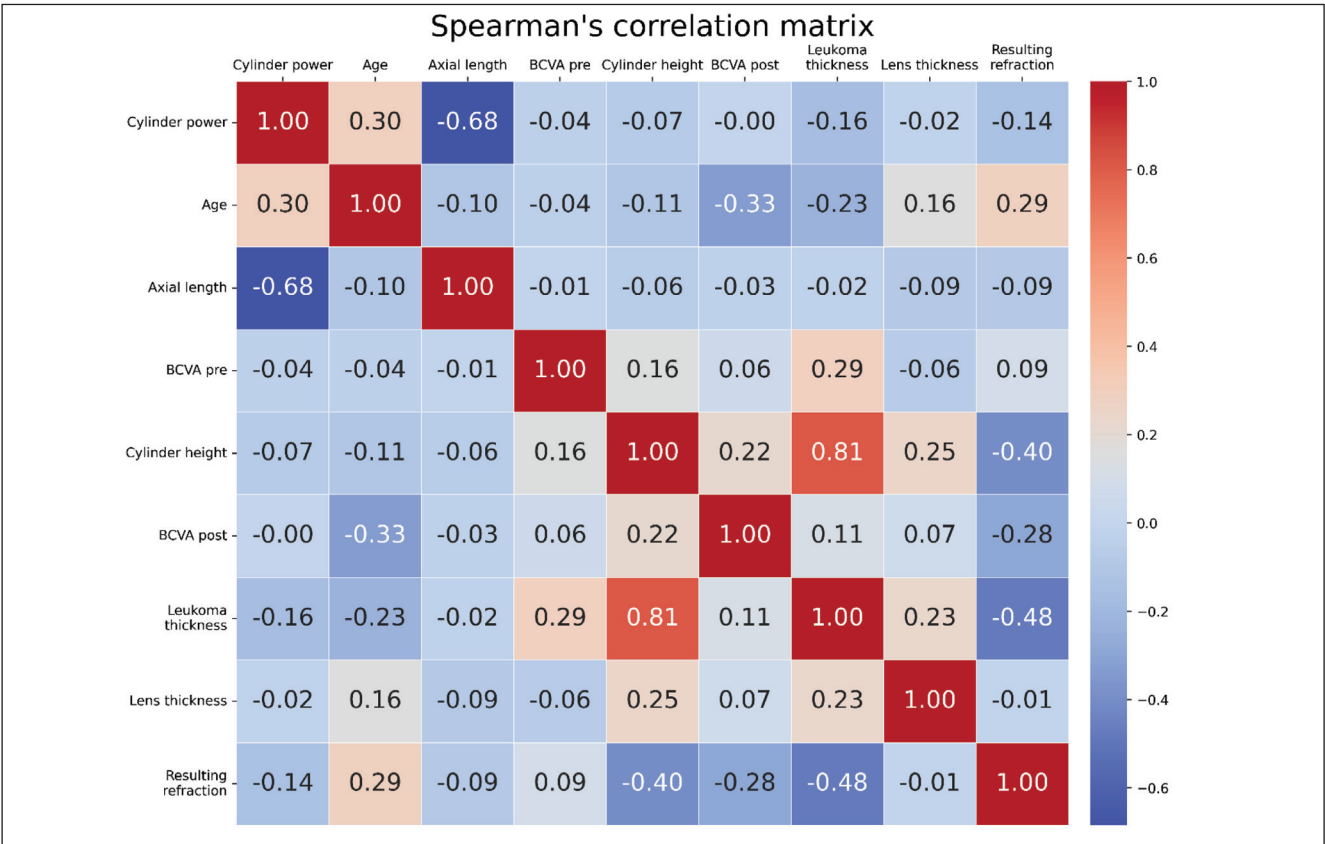


Рис. 3. Матрица корреляций по Спирмену между преломляющей силой оптического цилиндра и параметрами глаз пациентов

Fig. 3. Spearman's correlation matrix between the dioptric power of an optical cylinder and the parameters of patients' eyes

На следующем этапе исследования проводили корреляционный анализ по Спирмену между показателями глаза пациентов и преломляющей силой оптического цилиндра (табл. 3, рис. 3–6). Между целевой переменной и длиной глаза выявлена статистически значимая обратная корреляционная связь заметной силы ($r = -0,685$, $p < 0,001$). В связи с этим данный признак был положен в основу разработки модели линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра кератопротеза.

Далее разрабатывали модель линейной регрессии на основании показателя длины глаза. Учитывая полученные результаты по метрикам качества (MAE и R^2) (рис. 7) и полученной предсказуемости в пределах $\pm 0,50$ дптр в 30,0 % случаев и $\pm 1,00$ дптр в 50 % случаев (рис. 8) на тестовой выборке, принято решение разработать модель на основании двух признаков: длины глаза и общей толщины бельма. Модель с двумя признаками показала лучшее качество, чем модель с одним признаком, на тестовой выборке по всем метрикам качества (MAE и R^2) (рис. 9) и полученной предсказуемости в пределах $\pm 0,50$ и $\pm 1,00$ дптр, которые составили 30,0 и 70,0 % соответственно (рис. 10).

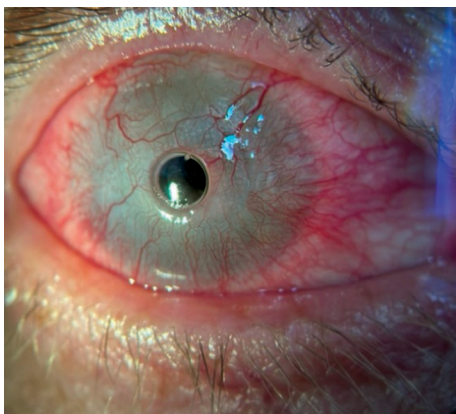


Рис. 4. Состояние после второго этапа кератопротезирования пациента с постожоговым сосудистым бельмом роговицы, МКОЗ — 0,6, н/к

Fig. 4. Eye condition after the second stage of keratoprosthesis implantation in patient with post-burn corneal leucoma. BCVA 0.6

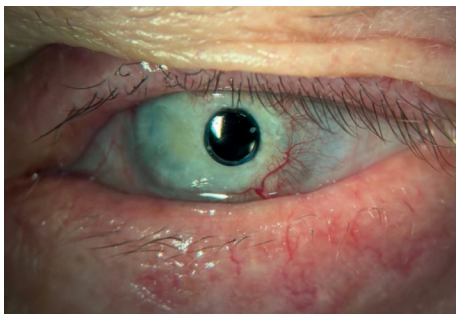


Рис. 5. Состояние после второго этапа кератопротезирования пациента с посттравматическим сосудистым бельмом роговицы, с укреплением аутохряща в анамнезе, МКОЗ — 0,2, с коррекцией — 0,5 дптр

Fig. 5. Eye condition after the second stage of keratoprosthesis implantation in patient with post-traumatic corneal leucoma and cartilage autograft covering. BCVA — 0.2, correction 0.5 D

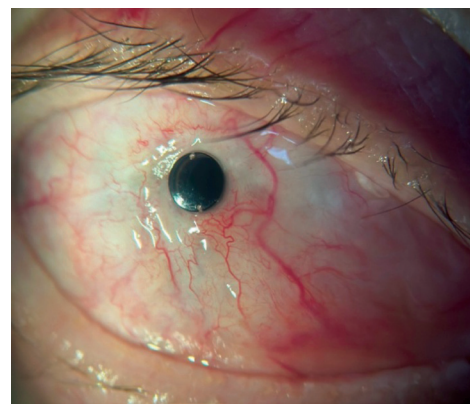


Рис. 6. Состояние после второго этапа кератопротезирования пациента с постожоговым сосудистым бельмом роговицы, с укреплением аутофасцией височной мышцы в анамнезе, МКОЗ — 0,8, с коррекцией + 0,5 дптр

Fig. 6. Eye condition after the second stage of keratoprosthesis implantation in patient with post-burn corneal leucoma and temporal fascia autograft covering. BCVA — 0.8, correction +0.5 D

Таблица 4. Метрики качества моделей линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра кератопротеза

Table 4. Quality metrics of linear regression models for calculating the dioptric power of an optical cylinder

Признаки в модели Parameters in the model	MAE		R^2	
	Обучающая выборка Train sample	Тестовая выборка Test sample	Обучающая выборка Train sample	Тестовая выборка Test sample
Длина глаза Axial length	0,95	1,56	0,45	0,52
Длина глаза, общая толщина бельма Axial length, total leucoma thickness	0,98	1,11	0,62	0,80

Примечание: MAE — mean absolute error (средняя абсолютная ошибка), R^2 — коэффициент детерминации.
Note: MAE — mean absolute error, R^2 — coefficient of determination.

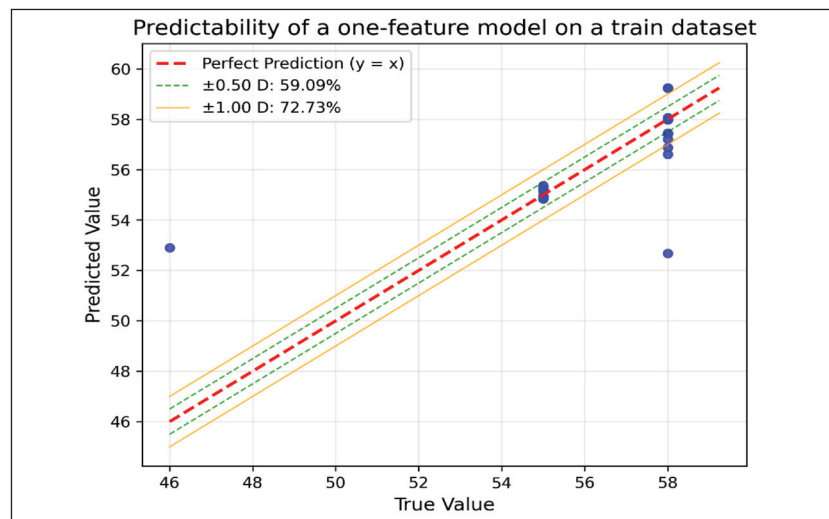


Рис. 7. Предсказуемость модели линейной регрессии с одним признаком (длиной глаза) на обучающем наборе данных

Fig. 7. Predictability of the linear regression one-feature model (axial length) on a train dataset

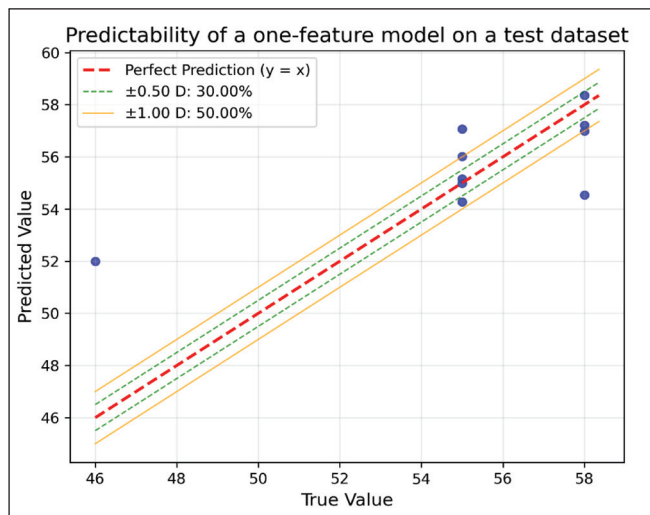


Рис. 8. Предсказуемость модели линейной регрессии с одним признаком (длиной глаза) на тестовом наборе данных

Fig. 8. Predictability of the linear regression one-feature model (axial length) on a test dataset

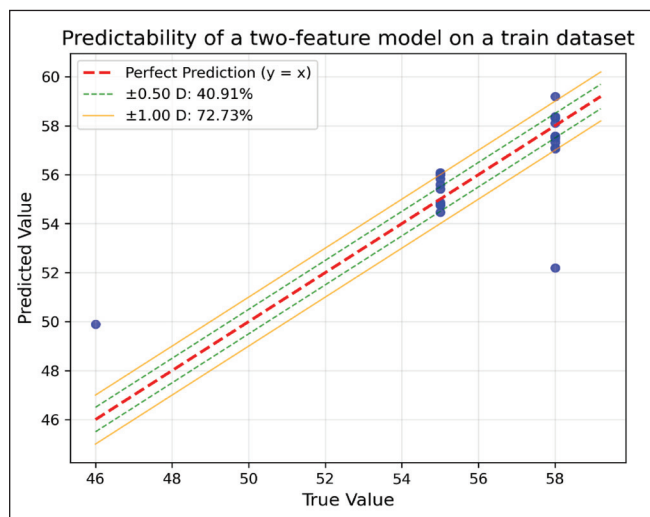


Рис. 9. Предсказуемость модели линейной регрессии с двумя признаками (длиной глаза и общей толщиной бельма) на обучающем наборе данных

Fig. 9. Predictability of the linear regression two-feature model (axial length and total leucoma thickness) on a train dataset

Таблица 5. Коэффициенты модели линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра

Table 5. Linear regression model coefficients for calculating the dioptric power of an optical cylinder

Признак Feature	Модель с одним признаком One-feature model		Модель с двумя признаками Two-feature model	
	Коэффициент Coefficient	p-value	Коэффициент Coefficient	p-value
Intercept	123,0158	<0,001	128,6124	<0,001
Длина глаза Axial length	-2,8535	<0,001	-2,9218	0,001
Толщина бельма Leucoma thickness	-	-	-0,0049	0,009

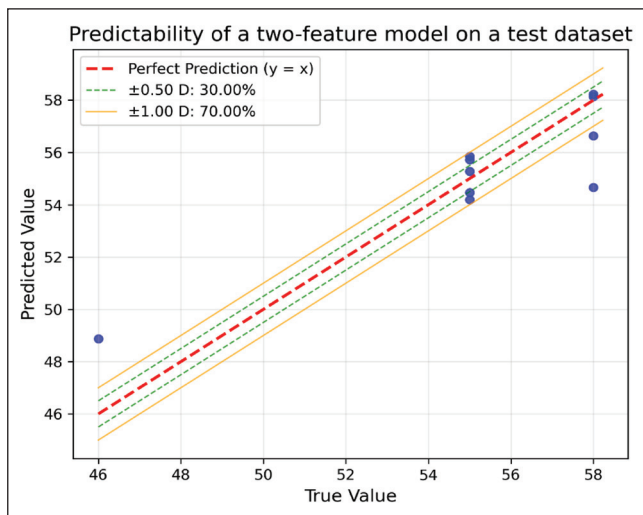


Рис. 10. Предсказуемость модели линейной регрессии с двумя признаками (длиной глаза и общей толщиной бельма) на тестовом наборе данных

Fig. 10. Predictability of the linear regression two-feature model (axial length and total leucoma thickness) on a test dataset

Коэффициенты разработанных моделей линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра представлены в таблице 5. Разработанные модели и коэффициенты были статистически значимыми ($p < 0,05$).

Таким образом, модель линейной регрессии с двумя признаками имеет следующую формулу: Преломляющая сила оптического цилиндра = $128,6124 - 2,9218 \times \text{Длина глаза (мм)} - 0,0049 \times \text{Толщина бельма (мкм)}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из актуальных вопросов кератопротезирования является разработка оптимальной конструкции и параметров оптического цилиндра кератопротеза, что, в свою очередь, определяет хирургическую тактику, сроки выполнения операции, а также в значительной степени влияет на стабильный послеоперационный результат и зрительную реабилитацию пациентов [9].

На территории РФ выполняется двухэтапное кератопротезирование, при котором во время второго этапа производится вкручивание оптического цилиндра. Именно этот факт позволяет производить подготовку к оптическому этапу, вносить корректировки в расчеты с учетом данных об укреплении бельма до протезирования или после первого этапа [10].

При определении рефракции кератопротеза для факического глаза необходимо знать, какой была рефракция роговой оболочки и клиническая рефракция глаза до заболевания, но, как правило, эти данные получить невозможно. В соответствии с этим на факических глазах применяют протезы стандартной оптической силы исходя из того, что преломляющая сила роговицы схематического глаза по Гульштранду составляет 43,5 дптр [11].

Так, зарубежные фирмы «Морхат» (Германия), «Райнер» (Англия), лаборатория Колумбийского университета (США) изготавливают сквозные протезы роговой оболочки для факичного глаза с рефракцией от 45,0 до 46,5 дптр [12].

Если для факичного глаза практически невозможно рассчитать рефракцию оптической части протеза и подобрать ее индивидуально, то для афакичного глаза основной величиной, определяющей оптическую силу кератопротеза, является ПЗО. При двух постоянных величинах, заданных в конструкции протеза (длина оптической части протеза и радиус передней поверхности оптической части), рефракцию протеза можно рассчитать по формуле А. И. Колинко:

$$D_k = D_1 + D_2 - L/n_2 \times D_1 \times D_2,$$

где D_k — суммарная рефракция; D_1 — рефракция передней поверхности протеза; D_2 — рефракция задней поверхности протеза; L — длина оптической части протеза; n_2 — показатель преломления материала оптической части протеза.

Однако данная формула не учитывает данные толщины сосудистого бельма и глубину залегания опорной пластины в толще бельма, что приводит к аметропии в послеоперационном периоде.

За рубежом одним из самых используемых кератопротезов является Boston KPRO. Данная модель кератопротеза отличается одноэтапной имплантацией опорного и оптического элементов [13, 14].

Следует сказать, что в зарубежной литературе публикуется мало информации по расчету диоптрийной силы оптического цилиндра и послеоперационной рефракции. Основными параметрами, на которые ориентируются зарубежные авторы для подбора оптической силы Boston KPRO, являются: длина глаза, коэффициент преломления передней и задней поверхности цилиндра, ожидаемая рефракция. Кератометрия для расчета оптики закладывается стандартная и равна 45,0 дптр [15–17].

Данный подход к подбору оптического цилиндра кератопротеза, так же как и в случае предыдущей формулы, лишен индивидуальности и не включает данные толщины роговицы. Следует отметить, что одномоментная

имплантация неразборных моделей кератопротеза полностью исключает замену оптического цилиндра в случае аметропии, помутнения нативного хрусталика, изменения положения ИОЛ/ИХД, что также может требовать их удаления.

В нашем исследовании проанализированы результаты лечения 90 пациентов, в ходе которого было выявлено, что для расчета диоптрийной силы оптического цилиндра основополагающими критериями являются: длина глаза пациента, общая толщина сосудистого бельма и факичность. Были проведены эксперименты с расчетом на основе положения пластины интрастромально (глубина залегания), но к повышению точности расчета это не привело, однако прослеживается стойкая корреляция между общей толщиной бельма и глубиной залегания пластины.

Именно поэтому существует необходимость разработки алгоритма расчета индивидуального оптического цилиндра для достижения быстрой зрительной реабилитации и улучшения качества жизни пациентов с послеожоговыми и терминальными дистрофическими бельмами роговицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск оптимального алгоритма подбора оптического цилиндра кератопротеза является важным и актуальным направлением для исследования. Разработана модель линейной регрессии для расчета преломляющей силы оптического цилиндра кератопротеза на основании данных длины глаза и общей толщины бельма, которая показала предсказуемость в пределах $\pm 1,00$ дптр в 70,0 % случаев.

Тем не менее необходимо проведение дальнейших наблюдений для усовершенствования данной модели.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Головин А.В. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы; сбор, анализ и обработка материала; написание текста; редактирование; окончательное утверждение версии, подлежащей публикации;
Манцова В.Р. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы; сбор, анализ и обработка материала; написание текста; редактирование;
Трошина А.А. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы; сбор, анализ и обработка материала; написание текста; редактирование;
Кечин Е.В. — статистическая обработка данных;
Прошко А.В. — сбор, анализ и обработка материала; написание текста.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Малюгин БЭ, Борзенко СА, Ковшун ЕВ, Головин АВ, Шацких АВ. Морфологические изменения роговицы кролика при имплантации новой модели опорной пластинки кератопротеза. *Вестник офтальмологии*. 2020;136(5):7786. Malugin BE, Borzenok SA, Kovshun EV, Golovin AV, Shatskikh AV. Morphological changes in rabbit cornea after implantation of a new keratoprosthesis supporting plate. *Russian Annals of Ophthalmology*. 2020;136(5):7786. (In Russ.).
- Грищенко МВ, Масникова ВВ, Нефедов ДА. Протезирование роговицы: от прошлого к будущему. *Российский офтальмологический журнал*. 2023;16(3):141–146. doi: 10.21516/2072-0076-2023-16-3-141-146. Grishchenko MV, Myasnikova VV, Nefedov DA. Keratoprosthesis: from the past to the future. *Russian Ophthalmological Journal*. 2023;16(3):141–146. (In Russ.). doi: 10.21516/2072-0076-2023-16-3-141-146.
- Avadhanam VS, Smith HE, Liu C. Keratoprosthesis for corneal blindness: a review of contemporary devices. *Clin Ophthalmol*. 2015 Apr 16;9:697–720. doi: 10.2147/OPTH.S27083.
- Катаев МГ, Головин АВ, Нефедова ОН, Трофимова ИЮ. Укрепление бельма аутооттрансплантатом височной фасции при кератопротезировании. *Офтальмохирургия*. 2024;2(139):43–51. doi: 10.25276/0235-4160-2024-2-43-51. Kataev MG, Golovin AV, Nefedova ON, Trofimova IYu. Dependable covering of keratoprosthesis with temporal fascia autograft. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2024;2(139):43–51. (In Russ.). doi: 10.25276/0235-4160-2024-2-43-51.
- Zarei-Ghanavati M, Avadhanam V, Vasquez Perez A, Liu C. The osteo-odonto-keratoprosthesis. *Curr Opin Ophthalmol*. 2017 Jul;28(4):397–402. doi: 10.1097/ICU.0000000000000388.
- Головин АВ, Борзенко СА, Латыпов ИА, Манцова ВР, Трошина АА, Прошко АВ, Кечин ЕВ. Клинико-функциональные результаты имплантации интраламеллярных пластинчатых кератопротезов модифицированного типа по Фёдорову – Зуеву у больных с бельмами роговицы ожогового происхождения и тяжёлыми формами дистрофий роговицы. *Фёдоровский журнал офтальмохирургии*. 2025;2с(145):136–146. Golovin AV, Borzenok SA, Latypov IA, Mantsova VR, Troshina AA, Proshko AV, Kechin E.V. Clinical and functional results of modified Fyodorov – Zuev keratoprosthesis intralamellar plate implantation in patients with corneal leucomas due to burns and severe forms of corneal dystrophies. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2025;2s(145): 136–146. doi: 10.25276/0235-4160-2025-2S-136-146 (In Russ.)

7. Hull CC, Liu CS, Sciscio A, Eleftheriadis H, Herold J. Optical cylinder designs to increase the field of vision in the osteo-odonto-keratoprosthesis. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2000 Dec;238(12):1002–1008. doi: 10.1007/s004170000191.
8. Lee RM, Ong GL, Lam FC, White J, Crook D, Liu CS, Hull CC. Optical functional performance of the osteo-odonto-keratoprosthesis. *Cornea*. 2014 Oct;33(10):1038–1045. doi: 10.1097/ICO.0000000000000235.
9. Huang Y, Yu J, Liu L, Du G. Moscow eye microsurgery complex in Russia keratoprosthesis in Beijing. *Ophthalmology*. 2011;118(1):41–46. doi: 10.1016/j.optha.2010.05.019.
10. Мороз ЗИ, Зуев ВК, Глазко ВИ. Сравнительная оценка трех видов кератопротезов, имплантированных в ожоговые бельма. *Оптикореconstructивные операции и аллопластика в офтальмологии*. М., 1974:39–43. Moroz ZI, Zuev VK, Glazko VI. Comparative evaluation of three types of keratoprosthesis implanted in burn leukomas. *Optical reconstructive operations and alloplasty in ophthalmology*. Moscow, 1974:39–43 (In Russ.).
11. Головин АВ, Трошина АА, Манцова ВР, Прошко АВ. Комплексный подход к хирургическому лечению катаракты у пациентов с сосудистыми бельмами на разных этапах кератопротезирования. *Офтальмохирургия*. 2025;2(144):16–28. doi: 10.25276/0235-4160-2025-2-16-28.
12. Harissi-Dagher M, Colby KA. Cataract extraction after implantation of a type I Boston keratoprosthesis. *Cornea*. 2008;27:220–222. doi: 10.1097/ICO.0b013e31815b7d69.
13. Langenbucher A, Szentmary N, Speck A, Seitz B & Eppig T. Calculation of power and field of view of keratoprosthesis. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2013;33:412–419. doi: 10.1111/opo.12046.
14. Hille K, Hille A, Ruprecht KW. Medium term results in keratoprosthesis with biocompatible and biological haptic. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2006;244:696–704. doi: 10.1007/s00417-005-0092-6.
15. Utine CA, Tzu J, Dunlap K & Akpek EK. Visual and clinical outcomes of explantation versus preservation of the intraocular lens during keratoprosthesis implantation. *J Cataract Refract Surg*. 2011;37:1615–1622. doi: 10.1016/j.jcrs.2011.03.045.
16. Becken W, Altheimer H, Esser G, Müller W & Uttenweiler D. Optical magnification matrix: near objects in the paraxial case. *Optom Vis Sci*. 2008;85:581–592. doi: 10.1097/OPX.0b013e31817db9f9.
17. Rosenblum WM, Christensen JL. Optical matrix method: optometric applications. *Am J Optom Physiol Opt*. 1974;51:9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Головин Андрей Владимирович

кандидат медицинских наук, заведующий операционным блоком

Манцова Валерия Романовна

аспирант, врач-офтальмолог

Трошина Анна Алексеевна

кандидат медицинских наук, врач-офтальмолог

Кечин Евгений Владимирович

кандидат медицинских наук, научный сотрудник
организационно-методического отдела

Прошко Александра Владимировна

аспирант, врач-офтальмолог

ABOUT THE AUTHORS

Golovin Andrey V.

PhD, head of surgery unit

Mantsova Valeriya R.

postgraduate, ophthalmologist

Troshina Anna A.

PhD, ophthalmologist

Kechin Evgeniy V.

PhD, researcher of the Organizational and methodological department

Proshko Aleksandra V.

postgraduate, ophthalmologist



ПЕРВЫЕ В РОССИИ

- Проведены две серьезные итерации, включая модификацию полимера и улучшение оптической части до требований международным стандартам CE
- Продано более 2000 000 линз
- Количество рекламаций снизилось до 0,01% (к объему проданных линз)



reper.ru
тел.: +7 831 260 11 73
Нижний Новгород, ул. Баррикад, д.1



Подписывайтесь
на Telegram



ПЕРВЫЕ В МИРЕ

- ✓ Rayner первыми в мире запустили производство интраокулярной линзы
- ✓ Произведено в Великобритании
- ✓ Премиальный сегмент

Reper - эксклюзивный дистрибьютор
компании Rayner в России



Каталоги Rayner