https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-4-62-69



Применение значений стандартной кератометрии по данным кератотопографического картирования для расчета оптической силы мультифокальной интраокулярной линзы

С.В. Шухаев¹, Э.В. Бойко^{1, 2, 3}, Ю.М. Петросян^{1, 2} , А.В. Молодкин¹

¹ Санкт-Петербургский филиал ФГАУ НМИЦ «МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, ул. Ярослава Гашека, д. 21а. Санкт-Петербург, 192283. Россия ² ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России, ул. Кирочная, д. 41. Санкт-Петербург, 191015. Россия ^з Санкт-Петербургский государственный университет. Университетская наб., д. 7–9. Санкт-Петербург, 199034. Россия

Цель работы — определение зон стандартной кератометрии по Pentacam-HR (SimK), оптимально подходящих для расчета мультифокальной интраокулярной линзы (ИОЛ) по 10 формулам. Материалы и методы. Обследованы 55 пациентов (55 глаз), которым была проведена факоэмульсификация катаракты (ФЭК) или рефракционная ленсэктомия с фемтолазерным сопровождением и имплантацией мультифокальной ИОЛ (Acrysof IO PanOptix) с достижением рефракции цели на разных расстояниях. Ретроспективный расчет оптической силы ИОЛ проводили по биометрическим данным ОА-2000 и кератометрическим показателям Pentacam (зоны от 0,5 до 5 мм с шагом 0,5 мм по карте Axial/Sagittal с центрацией по апексу и зрачку) с использованием 10 формул (SRK/T, Holladay 1, Holladay 2, Haigis, Hoffer Q, Barrett 2 Universal, Olsen, Kane, EVO ver. 2.0, Hill RBF ver. 3.0). Для каждой комбинации «зона / значение кератометрии / формула» рассчитана средняя ошибка послеоперационной прогнозируемой рефракции, отличие ее от нуля (критерий Уилкоксона), значение медианы с учетом знака, средняя (MAE) и срединная (MedAE) абсолютные ошибки расчета сферического эквивалента ИОЛ, стандартное отклонение средней абсолютной ошибки (SD). Результаты. Для всех формул наблюдался сдвиг в миопическую рефракцию, кроме формулы Haigis, которая смещалась в сторону гиперметропии. Отсутствие достоверного отличия от нуля показала только формула Капе в зонах 3,5, 4,5–5,0 мм при центрации по апексу и в зонах 0,5, 1,5, 2,5–5,5 мм при центрации по зрачку. Самые высокие значения МАЕ обнаружены у формул Наідія и Olsen, а минимальные показатели наблюдались у большинства формул в зонах 4,5–5,0 мм. Самые низкие значения MedAE во всех диапазонах показали формулы Kane, EVO, Holladay 1 и Holladay 2. Минимальные значения SD выявлены у формул Kane, EVO, Holladay 1 и Holladay 2. Заключение. Наиболее точной оказалась формула Капе в зоне 4,5-5,0 мм, затем следуют формулы EVO 2 и Holladay 1 в 4,0-мм зоне. Формула Haigis оказалась наименее точной. Остальные формулы могут быть рекомендованы к использованию с данными SimK Pentacam в зонах 4,0-5,0 мм.

Ключевые слова: кератометрия; кератотопография; зона роговицы; мультифокальная ИОЛ Конфликт интересов: отсутствует.

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

Для цитирования: Шухаев С.В., Бойко Э.В., Петросян Ю.М., Молодкин А.В. Применение значений стандартной кератометрии по данным кератотопографического картирования для расчета оптической силы мультифокальной интраокулярной линзы. Российский офтальмологический журнал. 2024; 17 (4): 62-9. https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-4-62-69

Application of standard keratometry values obtained from keratotopographic mapping data to calculate the optical power of a multifocal intraocular lens

Serdey V. Shukhaev¹, Ernest V. Boiko^{1, 2, 3}, Yury M. Petrosyan^{1, 2}, Anton V. Molodkin¹ ¹ Saint Petersburg Branch of the S.N. Fedorov NMRC "MNTK "Eye Microsurgery", 21, Hashek St., Saint-Petersburg, 192283, Russia

² Mechnikov North-West State Medical University, 41, Kirochnaya St., Saint-Petersburg, 191015, Russia
 ³ Saint Petersburg University, 7–9, Universitetskaya Embankment, Saint-Petersburg, 199034, Russia petrosyan.yurij@yandex.ru

Purpose of the study is to determine the zones of standard keratometry according to keratotopography data, which will allow for more accurate calculation of multifocal IOL using 10 formulas. Material and methods. The study included 55 patients (55 eyes) who underwent phacoemulsification of cataract or refractive lensectomy with femtolaser accompaniment, implantation of multifocal IOL (Acrysof IQ Pan Optix) and achieved the target refraction at different distances. Retrospective calculation of the optical power of the IOL was carried out using biometric data from OA-2000 and keratometric indicators of Pentacam (zones from 0.5 mm to 5 mm in increments of 0.5 mm on the Axial/ Sagittal map centered on the apex and pupil) using 10 formulas (SRK/T, Holladay 1, Holladay 2, Haigis, Hoffer Q, Barrett 2 Universal, Olsen, Kane, EVO ver. 2.0, Hill RBF ver. 3.0). For each combination of zone/keratometry value/formula, the average error of postoperative predicted refraction, its difference from zero (Wilcoxon criterion), the median value taking into account the sign, the mean (MAE) and median (MedAE) absolute errors in calculating the spherical equivalent of the IOL, the standard deviation of the mean absolute error (SD) were calculated. Results. All formulas had a shift to myopic refraction, except for the Haigis formula, which shifted towards hyperopia. The absence of a significant difference from zero was shown only by the Kane formula in zones 3.5, 4.5-5.0 mm when centered on the apex and in zones 0.5, 0.51.5, 2.5–5.5 mm when centered on the pupil. The highest values of MAE were found in Haigis and Olsen formulas, and the minimum values were observed in most formulas in the 4.5–5.0 mm zones. The lowest MedAE values in all ranges were shown by the formulas Kane, EVO, Holladay 1 and Holladay 2. The minimum SD values were found for the formulas Kane, EVO, Holladay 1 and Holladay 2. Conclusion. The Kane formula turned out to be the most accurate in the 4.5–5.0 mm zone. This is followed by the EVO 2 and Holladay 1 formulas in the 4.0 mm zone. The Haigis formula turned out to be the least accurate. The remaining formulas can be recommended for use with SimK Pentacam data in 4.0-5.0 mm zones.

Keywords: keratometry; keratotopography; corneal zone; multifocal IOL

Conflict of interests: there is no conflict of interest.

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

For citation: Shukhaev S.V., Boiko E.V., Petrosyan Yu.M., Molodkin A.V. Application of standard keratometry values obtained from keratotopographic mapping data to calculate the optical power of a multifocal intraocular lens. Russian ophthalmological journal. 2024; 17 (4): 62-9 (In Russ.). https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-4-62-69

Высокий функциональный результат и независимость от очков после хирургии хрусталика определяют успешность современной мультифокальной интраокулярной коррекции [1–4]. Микрохирургическая техника факоэмульсификации катаракты (ФЭК) в настоящее время достигла совершенства, и на первый план сегодня выходит повышение точности измерения параметров глаза и расчета сфероэквивалента (SE) интраокулярной линзы (ИОЛ) [5–11].

Преломляющая способность роговицы, как один из ключевых параметров, использующихся при расчете ИОЛ [12], может быть определена при помощи ручной кератометрии, автоматизированной кератометрии, оптической когерентной томографии, кератотопо- и томографии с использованием колец Пласидо и/или scheimpflugкамеры [13, 14].

Кератотопографическое картирование на основе scheimpflug-камеры является одним из самых современных методов исследования роговицы [15–17]. Вращающаяся камера с разрешением 1,45 мегапикселей анализирует 138 тыс. точек с поверхности роговицы и за короткий промежуток времени определяет большое количество параметров глаза:

оптическую силу роговицы (по данным разных карт, зон, колец и принципов ее расчета), значение пахиметрии, глубину передней камеры, толщину хрусталика, а также 3D-модель переднего сегмента глаза [15–17].

Несмотря на такое многообразие устройств и принципов их работы, стандартная кератометрия подразумевает только измерение радиуса кривизны передней поверхности роговицы и трансформирование ее в оптическую силу при помощи кератометрического индекса — 1,3375 [12].

Каждая конкретная роговица асферична, соответственно, от центра к периферии ее оптическая сила может меняться, что определено как эксцентричность. Роговица может быть «удлиненной» (Q-фактор отрицательный < 0) или «сплюснутой» (Q-фактор положительный > 0) [18]. В зависимости от этого может меняться и зона роговицы, определяющая актуальные для расчета ИОЛ значения. Правильный выбор зоны кератометрии и соответствие его определенной формуле могут повысить точность расчета сферического компонента ИОЛ.

Существует необходимость в повышении точности стандартных кератометрических данных, полученных в

ходе кератотопографического картирования применимо к расчету SE.

ЦЕЛЬЮ работы явилось определение зон стандартной кератометрии по Pentacam-HR (SimK), оптимально подходящих для расчета мультифокальной ИОЛ по 10 формулам.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

На первом этапе настоящего исследования выполнен ретроспективный анализ историй болезни пациентов, которым была проведена рефракционная ленсэктомия или ФЭК с фемтолазерным сопровождением и имплантацией в капсульный мешок мультифокальной ИОЛ (Acrysof IQ PanOptix) на базе Санкт-Петербургского филиала ФГАУ НМИЦ «МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России в период с 01.09.2018 по 01.01.2022. Из 127 пациентов были отобраны 98 человек с высокой остротой зрения в раннем послеоперационном периоде. Эти пациенты были приглашены на дополнительное обследование через 3–9 мес (6,0 ± 2,3 мес) после операции. Все пациенты подписали информированное согласие на медицинское обследование и хирургическое вмешательство.

Предоперационное обследование. Всем пациентам было проведено стандартное офтальмологическое обследование, в том числе оптическая биометрия (OA-2000 Tomey corp., ver. 3B), снимок электронной системы слежения (Verion, Alcon inc.) и кератотопография (Pentacam HR, Oculus ver 1.21r65).

Критерии включения в исследование. Все пациенты получили целевую эмметропическую рефракцию и не нуждались в коррекции зрения вдаль и вблизи. Таким образом, ошибка при оценке субъективной послеоперационной рефракции была либо полностью исключена, либо сведена к минимуму [19].

Критерии исключения из исследования: интра- и послеоперационные осложнения, аметропии высокой степени, астигматизм более 0,75 дптр, офтальмологические вмешательства в анамнезе, другие глазные заболевания.

Если оба глаза одного и того же пациента соответствовали критериям включения/исключения, то для исследования случайным образом выбирался один глаз.

Критериям включения/исключения соответствовали 55 пациентов (55 глаз — 19 правых и 36 левых), из них 21 мужчина и 34 женщины, средний возраст — 54,5 ± 10,3 года.

Расчет ИОЛ перед операцией был основан на данных ОА-2000, а оптическая сила ИОЛ была выбрана с учетом индивидуальных поправок хирурга. В позднем послеоперационном периоде для пациентов, которые соответствовали критериям включения и исключения, ИОЛ ретроспективно рассчитывали по 10 формулам (SRK/T, Holladay 1, Holladay 2, Haigis, Hoffer Q, Barrett 2 Universal, Olsen, Kane, EVO ver. 2.0, Hill RBF ver. 3.0). Биометрические данные (передне-задняя ось, глубина передней камеры, толщина хрусталика, расстояние от белого до белого) определяли с помощью ОА-2000, кератометрические — с помощью Pentacam-HR. Константы для расчета брали с сайта iolcon.org (дата обращения — 12.12.2022). Для дальнейшего анализа использовалась послеоперационная прогнозируемая рефракция для имплантированной диоптрийности ИОЛ. Применяли данные кератометрии в зонах от 0,5 до 5 мм с шагом 0,5 мм по карте Power Distribution (Axial/Sagittal) с центрацией по апексу и зрачку. Таким образом, при расчете ИОЛ использовали 2 показателя кератометрии по 10 зонам и 10 формулам, что в итоге составило 200 вариантов расчета для каждого пациента.

Хирургия. Операцию удаления хрусталика выполняли с помощью фемтосекундного лазера LenSx (Alcon inc.) с ис-

пользованием системы слежения Verion. Во время лазерного этапа производили капсулотомию (5,5 мм) и факофрагментацию. Всем пациентам выполнена стандартная ФЭК одним хирургом (С.В. Шухаевым) на системе Centurion Vision System (Alcon inc.) с использованием одинаковой хирургической техники.

Послеоперационное обследование. В отдаленном послеоперационном периоде всем пациентам выполняли авторефрактометрию, определяли субъективную рефракцию и остроту зрения для дали и близи (фороптер Nidec RT5100).

Статистический анализ выполняли при помощи программ Statistica 10 и Microsoft Office Excel. Для каждой комбинации «формула/зона» были рассчитаны следующие значения: средняя ошибка послеоперационной прогнозируемой рефракции (mean error — ME), отличие ME от нуля (критерий Уилкоксона, статистическая достоверность при p < 0,05) и значение медианы с учетом знака. Затем выполнялась оптимизация констант ИОЛ для каждой формулы путем вычисления средней арифметической ошибки с учетом знака и корректировки данных на величину, равную данной ошибке, в каждой группе. После оптимизации констант рассчитывались средняя (mean absolute error — MAE) и срединная (median absolute error — MedAE) абсолютные ошибки расчета SE ИОЛ, а также стандартное отклонение MAE (standard deviation — SD) [20, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Дооперационные биометрические данные и среднее значение SE имплантированых ИОЛ представлены в таблице.

Результаты средней ошибки расчета до оптимизации констант показаны на рисунке 1.

Анализ данных, представленных на рисунке 1, демонстрирует основные тенденции: сдвиг ошибки в сторону миопии у всех формул, кроме Haigis, для которой явно видно смещение в сторону гиперметропии; средние значения, близко расположенные к нулю, можно отметить у двух формул: Капе и EVO, особенно при центрации по зрачку; к периферии разброс данных становится меньше у большинства формул.

На рисунке 2 показаны значения p при сравнении МАЕ с нулем. Уровень р > 0,05 указывает на отсутствие достоверных отличий от нуля и сопоставимости прогнозируемой формулы рефракции с фактически полученной.

Только формула Капе показала отсутствие достоверных отличий от нуля в зонах 3,5, 4,5–5,0 мм при центрации по апексу и в зонах 0,5, 1,5, 2,5–5,0 мм по зрачку.

Гистограмма данных MedAE с учетом знака до оптимизации констант представлена на рисунке 3.

Талица. Основные биометрические дооперационные показатели по данным оптического биометра, которые использовались для ретроспективного расчета ИОЛ

Table. The main biometric preoperative indicators according to the optical biometer data, which were used for the retrospective calculation of the IOL

ПЗО, мм	ГПК, мм	TX, мм	WTW, мм	SE, дптр
AL, mm	ACD, mm	LT, mm	WTW, mm	SE, D
$23,24 \pm 0,87$	$3,36\pm0,24$	$4,\!24\pm0,\!44$	$11,94 \pm 0,41$	$23,\!64\pm4,\!19$

Примечание. ПЗО — передне-задняя ось, ГПК — глубина передней камеры, ТХ — толщина хрусталика, WTW — расстояние от белого до белого, SE — средние значения сферического компонента имплантированных ИОЛ.

Note. AL — axial length, ACD — anterior chamber depth, LT — lens thickness, WTW — white to white distance, SE — spherical equivalent of the IOL.



Рис. 1. Блочная диаграмма средней ошибки расчета каждой комбинации «формула/зона» с центрацией кератометрических данных по апексу (А) и зрачку (Б)

Fig. 1. Diagram of the average calculation error of each formula/zone combination with the concentration of keratometric data on the apex (A) and pupil (B)



Рис. 2. Значения *p* по критерию Уилкоксона. Зеленым цветом выделены комбинации «зона/формула», имеющие достоверное отличие от полученной эмметропической рефракции. Красным цветом показаны комбинации «зона/формула», которые не имеют статистически достоверного отличия прогнозируемой рефракции от фактической

Fig. 2. P values according to the Wilcoxon criterion. The zone/formula combinations that have a significant difference from the obtained emmetropic refraction are highlighted in green. The red color shows the zone/formula combinations that do not have a statistically significant difference between the predicted refraction and the actual one

Минимальные отклонения (менее 0,1 дптр) продемонстрировали формулы EVO и Капе при центрации по апексу, а при центрации по зрачку только формула Капе в зонах 0,5, 1,5, 4,0–5,0 мм.

При использовании неоптимизированных констант (реальные клинические условия) с сайта iolcon.org все формулы, кроме Haigis и Kane, дают достоверную ошибку расчета в сторону миопизации в пределах 0,25–0,75 дптр. Формула Kane в зонах 3,5, 4,0–5,0 мм показывает незначительный сдвиг в сторону миопии без достоверных отличий от нуля и минимальных значений медианы.

После оптимизации констант в рамках группы пациентов, включенных в исследование, были рассчитаны MAE, MedAE (рис. 4) и SD (дисперсия данных).

Медиана axial Apex										Медиана axial Pupil											
Holl 2	-0,450	-0,500	-0,460	-0,410	-0,460	-0,450	-0,480	-0,450	-0,440	-0,400	Holl 2	-0,450	-0,390	-0,420	-0,410	-0,420	-0,440	-0,420	-0,380	-0,350	-0,370
Barrett	-0,300	-0,200	-0,290	-0,290	-0,260	-0,220	-0,220	-0,210	-0,210	-0,210	Barrett	-0,200	-0,300	-0,290	-0,200	-0,250	-0,220	-0,210	-0,190	-0,210	-0,190
Olsen	-0,220	-0,210	-0,210	-0,180	-0,190	-0,210	-0,210	-0,200	-0,210	-0,210	Olsen	-0,150	-0,210	-0,210	-0,220	-0,220	-0,210	-0,210	-0,210	-0,210	-0,200
Halgis	0,300	0,310	0,310	0,280	0,330	0,330	0,330	0,330	0,320	0,290	Haigis	0,330	0,360	0,390	0,370	0,390	0,330	0,350	0,330	0,360	0,340
Hoffer	-0,340	-0,320	-0,310	-0,300	-0,260	-0,200	-0,230	-0,250	-0,230	-0,200	Hoffer	-0,300	-0,200	-0,200	-0,290	-0,250	-0,240	-0,230	-0,230	-0,229	-0,200
Holl 1	-0,390	-0,400	-0,420	-0,400	-0,380	-0,420	-0,390	-0,380	-0,360	-0,340	Holl 1	-0,380	-0,410	-0,420	-0,390	-0,390	-0,390	-0,360	-0,370	-0,360	-0,340
SRK/T	-0,350	-0,320	-0,320	-0,310	-0,300	-0,290	-0,280	-0,290	-0,310	-0,250	SRK/T	-0,329	-0,320	-0,320	-0,310	-0,300	-0,310	-0,290	-0,310	-0,250	-0,250
Kane	-0,130	-0,120	-0,090	-0,080	-0,100	-0,100	-0,090	-0,080	-0,080	-0,060	Kane	-0,090	-0,120	-0,300	-0,130	-0,120	-0,120	-0,110	-0,080	-0,090	-0,080
EVO	-0.240	-0,210	-0,180	-0,170	-0,170	-0,130	-0.090	-0,100	-0,140	-0,120	EVO	-0,180	-0,160	-0,190	-0,160	-0,140	-0,120	-0,120	-0,130	-0,130	-0,150
Hill	-0,330	-0,320	-0,310	-0,270	-0,250	-0,290	-0,290	-0,260	-0,290	-0,290	Hill	-0,270	-0,260	-0,250	-0,270	-0,270	-0,260	-0,270	-0,280	-0,280	-0,250
	0,5mm	fimm	1,5mm	2mm	2,5mm	3mm	3,5mm	4mm	4,5mm	5mm		0,5mm	fmm	1,5mm	2nm	2,5mm	3mm	3,5mm	4mm	4,5mm	\$mm
между ± 0,1				MRX(0) ± 0,25					BHB ±0,25		MEX(2) ± 0,1				M0xgy ± 0,25					BHB ±0,25	







Fig. 4. Mean and median absolute errors for each zone/formula combination. MAE by apex and pupil (Α, Б), MedAE by apex and pupil (Β, Γ)

Самые высокие (> 0,3 дптр) значения МАЕ показали формулы Haigis и Olsen (центрация по зрачку). Остальные формулы выявили значение MAE > 0,3 дптр в различных зонах, с явной тенденцией к уменьшению показателей к периферии. Большинство формул минимальные значения MAE дают в зонах 4,5–5,0 мм. В отличие от MAE, MedAE демонстрирует низкие значения (< 0,3 дптр) в большем диапазоне зон. Некоторые формулы (Kane, EVO, Holladay 1 и 2) показывают MedAE < 0,31 дптр практически во всем диапазоне при центрации по зрачку. Последняя в большинстве комбинаций дает более низкие показатели медианы в сравнении с центрацией по апексу.

Ключевое значение, по мнению J. Holladay и соавт. [21], при сравнении точности расчета ИОЛ имеет показатель раз-

броса данных. Данные SD от средних величин МАЕ представлены на рисунке 5.

Минимальные значения дисперсии демонстрируют формулы Kane, Holladay 1 и 2 — около 0,3 дптр, преимущественно в зонах 4,0–5,0 мм, затем следуют формулы EVO и Hill RBF. Подтверждается тенденция к снижению дисперсии к периферии (см. рис. 1), однако многие формулы в зоне 5 мм демонстрируют некоторое увеличение SD.

обсуждение

В настоящем исследовании выполнена попытка системного подхода к расчету сферического компонента ИОЛ с точки зрения кератометрии как функции точности попадания в рефракцию цели. В каждом конкретном слу-



Рис. 5. Дисперсия данных всей совокупности сочетаний «зона/формула» с центрацией по апексу и зрачку

Fig. 5. The standard deviation of the data of the entire combination of zone/formula combinations with the apex and pupil centering

чае выполняли расчет ИОЛ с использованием идентичных биометрических показателей, кроме значения оптической силы роговицы. Ее значение вводили в формулы по зонам стандартной кератометрии (SimK) с Pentacam-HR с использованием метода картирования: минимальный шаг в 0,5 мм в рабочем диапазоне 0,5–5,0 мм. Такой подход позволяет проследить влияние асферичности роговицы по SimK на точность расчета по различным формулам (см. рис. 1).

На наш взгляд, использование именно зоны, а не кольца кератометрии, как это реализуется в оптических биометрах, является правильным, так как зона демонстрирует совокупность данных внутри указанного диаметра без слепых зон, что цельно отражает средние значения кератометрии. предназначенные для формул расчета. Однако следует отметить, что большинство формул подгонялось под стандартную кератометрию приборов отражающего типа, которая оценивает данные в кольце с различными внутренним и наружным диаметрами. В нашем исследовании выполнялся поиск оптимального сочетания зоны кератометрии и формулы расчета, что также можно назвать подгонкой существующих формул к определенным кератометрическим показателям. Тем не менее подобный метод на основе эмпирических данных используется повсеместно и, безусловно, позволяет повысить точность расчета.

Вычислены основные показатели, характеризующие точность конкретной формулы. До оптимизации констант это отклонение от фактической рефракции с учетом знака и значение медианы средней ошибки. После оптимизации констант были рассчитаны МАЕ, MedAE и SD. По совокупности описанных показателей можно выделить формулу Капе. Это единственная формула, имеющая недостоверное отклонение от полученной эмметропической рефракции в зонах 3,5, 4,5-5,0 мм при центрации по апексу и в зонах 0,5, 1,5, 2,5-5,0 мм при центрации по зрачку. Формула Капе также продемонстрировала наименьшую ошибку расчета с оптимальным сочетанием всех перечисленных параметров в зонах 4,5-5,0 мм. Следующие формулы, которые также показали достаточно высокую точность расчета, - это формулы EVO ver. 2 и Holladay 1. В отличие от формулы Kane, они продемонстрировали достоверное отличие от фактической рефракции со сдвигом в миопию во всех зонах, но дали наименьшие показатели МАЕ, MedAE и SD в зонах 4,0-5,0 мм. Достоверно высокое отличие от фактической рефракции со значительным сдвигом в гиперметропию, а также высокие значения МАЕ и MedAE до и после оптимизации констант продемонстрировала формула Haigis, в связи с чем эту формулу не следует рекомендовать для расчета ИОЛ с использованием кератометрических показателей SimK с Pentacam-HR.

Кератометрия Pentacam-HR (карта Axial/Sagittal) переводит радиус кривизны передней поверхности роговицы в общую оптическую силу по формуле гауссовской оптики с использованием кератометрического индекса 1,3375 так же, как это делают все оптические биометры. Отличия заключаются не в принципах расчета, а в принципах измерения. С этой точки зрения результаты настоящего исследования можно сравнивать с исследованиями, в которых использовалась SimK оптических биометров и SimK с Pentacam-HR или других кератотопографов на основе scheimpflug-камеры.

Кератометрия в зависимости от марки используемого биометра дает различные результаты при использовании различных формул расчета [22-27]. В этих исследованиях низкие ошибки расчета чаще дают современные формулы, такие как EVO, Hill RBF, Kane, но и «старые» вергентные формулы показывают сопоставимые результаты [26, 27]. G. Savini и соавт. [26] показали, что при использовании SimK (биометр Тотеу ОА-2000) МАЕ была менее 0,3 дптр у большинства сравниваемых формул, за исключением формул Haigis, Hoffer O, Holladay 1; дисперсия данных была минимальна у формулы EVO 2 (0.306Д). В другом исследовании К. Darcy и соавт. [28] на большом материале (n = 10 930) с применением SimK «ИОЛ-Мастер 500» определили, что формула Капе показала самые низкие значения МАЕ и SD (0,37 и 0,49 дптр соответственно). В настоящем исследовании формула Капе также показала низкие значения МАЕ и SD, но при выборе правильной зоны эти значения были существенно ниже, чем в работе К. Darcy и соавт. [28] (0,23 и 0,28 дптр соответственно). При использовании кератометрии оптического биометра хирург завязан на точности этих данных и их пригодности для конкретной формулы. Использование данных кератометрии с одного прибора, но с выбранной зоны позволяет значительно улучшить точность расчета.

Если рассматривать исследования, в которых использовались данные SimK scheimpflug-камеры, можно отметить, что в большинстве ранних работ (до 2010 г.) при сравнении кератометрии оптического биометра и scheimpflug-камеры вергентные формулы 3–4 поколений демонстрировали лучшие результаты при использовании кератометрии с оптического биометра [29, 30], однако полученные ошибки расчета в этих исследованиях были относительно высокими (от 0,4 дптр и более). В более поздних исследованиях использование SimK в различных зонах показало схожие с полученными нами результаты. Сравнение кератометрии «ИОЛ-Мастер 500» и SimK Pentacam в зонах 2, 3, 4, 5 мм по трем классическим формулам (Hoffer Q, Holladay 1 и SRK/T) показало сопоставимость MedAE во всех зонах SimK с «ИОЛ-Мастером», что подтверждает отсутствие преимуществ данных SimK c scheimpflug-камеры по «старым» формулам [31]. При этом MAE по зонам Pentacam уменьшается к периферии так же, как и в настоящем исследовании (см. рис. 1). В работе A. Kirgiz и соавт. [32] SimK в исполнении Sirius (CSO Inc.) показала меньшие значения МАЕ во всех исследуемых зонах (3, 5, 7 мм), чем кератометрия Lenstar LS900 (Haag-Streit AG) по формуле SRK/T. В нашем исследовании в зоне 3,0 и 5,0 мм формула SRK/T дает сопоставимые, но более низкие значения МАЕ: 0,3 дптр против 0,38 дптр и 0,28 дптр против 0,36 дптр соответственно. Низкие значения MedAE получены G. Savini и соавт. [33] при использовании SimK в 3-мм зоне по формулам Hoffer Q, Holladay 1 и SRK/T 0.21-0,25 дптр. Минимальные ошибки расчета в работе G. Savini и соавт. [33] продемонстрировала формула Holladay 1 и показала результаты, сравнимые с данными большинства формул нашей работы в зонах 3,5-4,5 мм, кроме формулы Haigis, которая показала заметно худшие результаты, и формул EVO и Kane, которые в зонах 4,5-5,0 мм продемонстрировали наименьшие значения ошибки расчета по сравнению со всеми анализируемыми публикациями. Таким образом, в группе ранних исследований по-

казано либо преимущество, либо сравнимые результаты точности расчета ИОЛ с применением стандартной оптической и scheimpflug-кератометрии на вергентных формулах 3-4-го поколений. Исследований, в которых выполнялось сравнение двух описанных типов кератометрии на современных (предложенных после 2010 г.) формулах, в доступной литературе мы не обнаружили, так же как и работ с применением метода картирования кератометрических данных в той мере, в какой это было выполнено в нашем исследовании. В нашей работе выбор «лучшей» формулы выполнялся по совокупности различных показателей, включая дисперсию данных, которая, по мнению J. Holladay и соавт. [21], является ведущим критерием точности той или иной формулы. Мы применили подход, минимизирующий ошибку определения послеоперационной субъективной рефракции [19], включив в исследование только пациентов, у которых была получена острота зрения на все основные дистанции, не требующая очковой коррекции.

К ограничениям данного исследования следует отнести относительно небольшую выборку пациентов, оценку результатов только по одной модели хрусталика, использование ограниченного числа формул.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые использован системный подход в оценке точности расчета ИОЛ с применением метода картирования кератометрических данных, а также совокупности различных показателей, определяющих точность попадания в рефракцию цели, большой группы формул расчета сфероэквивалента.

Выявлены следующие закономерности:

 — формула Kane продемонстрировала минимальные значения MAE, MedAE, SD и была единственной формулой, не показавшей достоверных отличий от фактической рефракции в зонах 4,5–5,0 мм по SimK Pentacam;

 формулы EVO 2 и Holladay 1 показали лучшие, чем другие формулы (кроме Kane), показатели, и близкие к формуле Капе минимальные значения ошибок расчета в 4,0-мм зоне;

 формулу Haigis нецелесообразно использовать с данными SimK Pentacam из-за значительного гиперметропического сдвига и высоких значений MAE и MedAE расчета;

— формулы Holladay 2, HofferQ, SRK/T, Olsen, Barrett 2 Universal, Hill RBF могут быть рекомендованы к использованию с данными SimK Pentacam в зонах 4.0–5.0 мм.

В будущем необходимо оценить точность попадания в рефракцию цели с учетом полученных данных.

Литература/References

- Малюгин Б.Э., Морозова Т.А. Исторические аспекты и современное состояние проблемы мультифокальной интраокулярной коррекции. *Офтальмохирургия.* 2004; 3: 23–9. [Malyugin B.E., Morozova T.A. A Review of historical aspects and modern trends in multifocal intraocular correction. *Ophthalmic surgery.* 2004; 3: 23–9 (In Russ.)].
- Морозова Т.А., Покровский Д.Ф., Медведев И.Б., Керимов Т.З. Современные аспекты мультифокальной интраокулярной коррекции (обзор). Вестник Российской академии медицинских наук. 2017; 72 (4): 268–75. [Morozova T.A., Pokrovskiy D.F., Medvedev I.B., Kerimov T.Z. Modern aspects of multifocal intraocular correction: a review. Annals of the Russian academy of medical sciences. 2017; 72 (4): 268–75 (In Russ.)]. doi: 10.15690/ vramn835
- Бойко Э.В., Винницкий Д.А. Сравнение зрительной реабилитации с применением трифокальных и бифокальных интраокулярных линз (обзор литературы). Офтальмохирургия. 2018; 2: 67–74. [Boiko E.V., Vinnitskiy D.A. Rehabilitation of patients after implantation of bifocal and trifocal intraocular lens. Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2018; 2: 67–74 (In Russ.)]. doi: 10.25276/0235-4160-2018-2-67-74
- Малюгин Б.Э., Соболев Н.П., Фомина О.В. Анализ функциональных результатов имплантации новой модели трифокальной интраокулярной линзы. *Офтальмохирургия*. 2018; 4: 6–14. [Malyugin B.E., Sobolev N.P., Fomina O.V. Visual assessment performance after implantation of a new trifocal intraocular lens. *Fyodorov journal of ophthalmic surgery*. 2018; 4: 6–14 (In Russ.)]. doi: 10.25276/0235-4160-2017-4-6-14
- Беликова Е.И., Борзых В.А. Результаты имплантации трифокальных интраокулярных линз у пациентов с катарактой и пресбиопией. Офтальмология. 2018; 15 (3): 248–55. [Belikova EI, Borzykh V.A. Results of trifocal intraocular lenses implantation in patients with cataract and presbyopia. Ophthalmology in Russia. 2018; 15 (3): 248–55 (In Russ.)]. doi: 10.18008/1816-5095-2018-3-248-255
- Дога А.В., Майчук Н.В., Мушкова И.А., Шамсетдинова Л.Т. Причины, профилактика и коррекция рефракционных нарушений после факоэмульсификации с имплантацией интраокулярных линз. *Вестник офтальмологии.* 2019; 135 (6): 83–90. [Doga A.V., Maychuk N.V., Mushkova I.A., Shamsetdinova L.T. Causes, prevention and correction of refractive errors after phacoemulsification with intraocular lens implantation. *Vestnik oftal'mologii.* 2019; 135 (6): 83–90 (In Russ.)]. doi: 10.17116/ oftalma201913506183
- Першин К.Б., Пашинова Н.Ф., Лих И.А., Цыганков А.Ю., Легких С.Л. Особенности расчета оптической силы интраокулярных линз на экстремально коротких глазах. Офтальмология. 2022; 19 (1): 91–7. [Pershin K.B., Pashinova N.F., Likh I.A., Tsygankov A.Yu., Legkikh S.L. Intraocular lenses optic power calculation in extremely short eyes. Ophthalmology in Russia. 2022; 19 (1): 91–7 (In Russ.)]. doi: 10.18008/1816-5095-2022-1-91-97
- Трубилин В.Н., Ильинская И.А. Определение оптической силы роговицы с помощью различных методов исследования. Обзор литературы. *Катарактальная и рефракционная хирургия*. 2014; 14 (2): 4–9. [Trubilin V.N., Il'inskaya I.A. Determination of corneal optical power using various research methods. Literature review. *Kataraktal'naya i refrakcionnaya khirurgiya*. 2014; 14 (2): 4–9 (In Russ.)].
- Mehravaran S, Asgari S, Bigdeli S, Shahnazi A, Hashemi H. Keratometry with five different techniques: a study of device repeatability and inter-device agreement. *International Ophthalmology*. 2014; 34 (4): 869–75. doi:10.1007/ s10792-013-9895-3
- Aristodemou P, Knox Cartwright NE, Sparrow JM, Johnston RL. Formula choice: Hoffer Q, Holladay 1, or SRK/T and refractive outcomes in 8108 eyes after cataract surgery with biometry by partial coherence interferometry. J Cataract Refract Surg. 2011 Jan; 37 (1): 63–71. doi: 10.1016/j.jcrs.2010.07.032
- Nemeth G, Modis L. Ocular measurements of a swept-source biometer: Repeatability data and comparison with an optical low-coherence interferometry biometer. J Cataract Refract Surg. 2019 Jun; 45 (6): 789–7. doi: 10.1016/j. jcrs.2018.12.018

- Savini G, Hoffer KJ, Schiano Lomoriello D, Ducoli P. Simulated keratometry versus total corneal power by ray tracing. *Cornea*. 2017; 36 (11): 1368–72. doi:10.1097/ico.00000000001343
- Киселева Т.Н., Оганесян О.Г., Романова Л.И., Милаш С.В., ПенкинаА.В. Оптическая биометрия глаза: принцип и диагностические возможности метода. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2017; 12 (1): 35–42. [Kiseleva T.N., Oganesyan O.G., Romanova L.I., Milash S.V., Penkina A.V. Optical biometry of the eye: the principle and the diagnostic potential of the method. *Russian pediatric ophthalmology*. 2017; 12 (1): 35–42 (In Russ.)]. doi: 10.18821/1993-1859-2017-12-1-35-42
- Куликов А.Н., Кокарева Е.В., Котова Н.А. Сравнение результатов биометрии глаза при использовании различных приборов. *Тихоокеанский медицинский журнал.* 2017; 2: 53–4. [Kulikov A.N., Kokareva E.V., Kotova N.A. Comparison of the results of the eye biometrics using different instruments. *Pacific Medical Journal.* 2017; 2: 53–4 (In Russ.)]. doi: 10.17238/ PmJ1609-1175.2017.2.53–55
- 15. Mukhija R, Gupta N. Advances in anterior segment examination. *Community Eye Health*. 2019; 32 (107): S5–S6. PMID: 32123483.
- Kanclerz P, Khoramnia R, Wang X. Current developments in corneal topography and tomography. *Diagnostics*. 2021; 11 (8): 1466. doi: 10.3390/ diagnostics11081466
- 17. Fan R, Chan TC, Prakash G, Jhanji V. Applications of corneal topography and tomography: a review. *Clinical & experimental ophthalmology*. 2018; 46 (2): 133–46. doi: 10.1111/ceo.13136
- Holladay JT. Corneal topography using the Holladay Diagnostic Summary. J Cataract Refract Surg. 1997; 23 (2): 209–21. doi: 0.1016/S0886-3350(97)80344-6
- Grein HJ, Schmidt O, Ritsche A. Reproducibility of subjective refraction measurement. *Ophthalmologe*. 2014; 111 (11): 1057-64. doi: 10.1007/s00347-014-3064-6
- Wang L, Koch DD, Hill W, Abulafia A. Pursuing perfection in intraocular lens calculations: III. Criteria for analyzing outcomes. *J Cataract Refract Surg.* 2017; 43 (8): 999–1002. doi: 10.1016/j.jcrs.2017.08.003
- Holladay JT, Wilcox RR, Koch DD, Wang L. Review and recommendations for univariate statistical analysis of spherical equivalent prediction error for IOL power calculations. J Cataract Refract Surg. 2021; 47 (1): 65–77. doi: 10.1097/j. jcrs.000000000000370
- 22. Connell BJ, Kane JX. Comparison of the Kane formula with existing formulas for intraocular lens power selection. *BMJ Open Ophthalmol.* 2019; 4 (1): e000251. doi: 10.1136/bmjophth-2018-000251

- Savini G, Maita M, Hoffer KJ, et al. Comparison of 13 formulas for IOL power calculation with surements partial coherence interferometry. *Br J Ophthalmol.* 2021; 105 (4): 484–9. doi: 10.1136/bjophthalmol-2020-316193
- Hipólito-Fernandes D, Luís M, Gil P, et al. VRF-G, a new intraocular lens power calculation formula: A 13-Formulas arisony. *Clin Ophthalmol.* 2020; 14: 4395–402. doi: 10.2147/OPTH.S290125
- Lundström M, Dickman M, Henry Y, et al. Risk factors for refractive error after cataract surgery: Analysis of 282 811 cataract extractions reported to the European Registry of Quality Outcomes for cataract and refractive surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2018; 44 (4): 447–52. doi: 10.1016/j.jcrs.2018.01.031
- Savini G, Hoffer KJ, Balducci N, Barboni P, Schiano-Lomoriello D. Comparison of formula accuracy for intraocular lens power calculation based on measurements by a swept-source optical coherence tomography optical biometer. *J Cataract Refract Surg.* 2020; 46 (1): 27–33. doi: 10.1016/j. jcrs.2019.08.044
- Kane JX, Heerden A, Atik A, Petsoglou C. Intraocular lens power formula accuracy: Comparison of 7 formulas. J Cataract Refract Surg. 2016; 42 (10): 1490–500. doi: 10.1016/j.jcrs.2016.07.021
- Darcy K, Gunn D, Tavassoli S, Sparrow J, Kane JX. Assessment of the accuracy of new and updated intraocular lens power calculation formulas in 10930 eyes from the UK National Health Service. *J Cataract Refract Surg.* 2020; 46 (1): 2–7. doi: 10.1016/j.jcrs.2019.08.014
- Shammas HJ, Hoffer KJ, Shammas MC. Scheimpflug photography keratometry readings for routine intraocular lens power calculation. *J Cataract Refract Surg.* 2009; 35 (2): 330–4. doi: 10.1016/j.jcrs.2008.10.041
- Savini G, Barboni P, Carbonelli M, Hoffer KJ. Accuracy of a dual Scheimpflug Analyzer and a Corneal Topography System for intraocular lens power calculation in unoperated eyes. J Cataract Refract Surg. 2011; 37 (1): 72–6. doi: 10.1016/j.jcrs.2010.08.036
- Saad E, Shammas MC, Shammas HJ. Scheimpflug corneal power measurements for intraocular lens power calculation in cataract surgery. *Am J Ophthalmol*. 2013; 156 (3): 460–7. doi: 10.1016/j.ajo.2013.04.035
- Kirgiz A, Atalay K, Kaldirim H, et al. Scheimpflug camera combined with placido-disk corneal topography and optical biometry for intraocular lens power calculation. *Int Ophthalmol.* 2017; 37 (4): 781–6. doi: 10.1007/s10792-016-0330-4
- Savini G, Barboni P, Carbonelli M, Hoffer KJ. Comparison of methods to measure corneal power for intraocular lens power calculation using a rotating Scheimpflug camera. J Cataract Refract Surg. 2013; 39 (4): 598–604. doi: 10.1016/j.jcrs.2012.11.022

Вклад авторов в работу: С.В. Шухаев — разработка концепции и дизайна исследования, сбор данных и их интерпретация, написание статьи; Э.В. Бойко — разработка концепции и дизайна исследования, редактирование и финальная подготовка статьи к публикации; Ю.М. Петросян — разработка концепции и дизайна исследования, сбор и анализ данных, написание статьи; А.В. Молодкин — написание статьи. Authors' contribution: S.V. Shukhaev — development of the concept and design of the study, data collection and interpretation, writing of the article; E.V. Boyko — development of the concept and design of the study, editing and final preparation of the article for publication; Yu.M. Petrosyan development of the concept and design of the study, data collection and analysis, writing of the article; A.V. Molodkin — writing of the article.

Поступила: 19.10.2023. Переработана: 28.10.2023. Принята к печати: 30.10.2023 Originally received: 19.10.2023. Final revision: 28.10.2023. Accepted: 30.10.2023

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

¹ Санкт-Петербургский филиал ФГАУ НМИЦ «МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, ул. Ярослава Гашека, д. 21а, Санкт-Петербург, 192283, Россия

² ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России, ул. Кирочная, д. 41, Санкт-Петербург, 191015, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7—9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Сергей Викторович Шухаев — канд. мед. наук, врач-офтальмолог¹ Эрнест Витальевич Бойко — д-р мед. наук, профессор, директор¹, заведующий кафедрой офтальмологии², профессор кафедры оториноларингологии и офтальмологии³

Юрий Микаелович Петросян — врач-офтальмолог¹, аспирант кафедры офтальмологии²

Антон Вадимович Молодкин — врач-офтальмолог¹

Для контактов: Юрий Микаелович Петросян,

petrosyan.yurij@yandex.ru

¹ Saint Petersburg Branch of the S.N. Fedorov NMRC "MNTK "Eye Microsurgery", 21, Hashek St., Saint-Petersburg, 192283, Russia

² Mechnikov North-West State Medical University, 41, Kirochnaya St., Saint-Petersburg, 191015, Russia

³ Saint Petersburg University, 7–9, Universitetskaya Embankment, Saint-Petersburg, 199034, Russia

Serdey V. Shukhaev – Cand. of Med. Sci., ophthalmologist¹

Ernest V. Boiko — Dr. of Med. Sci., professor, director¹, head of chair of ophthalmology², professor of chair of ophthalmology and otorhinolaryngology³

Yury M. Petrosyan – ophthalmologist¹, PhD student of chair of ophthalmology²

Anton V. Molodkin – ophthalmologist¹

For contacts: Yury M. Petrosyan, petrosyan.yurij@yandex.ru