https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-4-118-125

Особенности факоэмульсификации и расчета интраокулярных линз у пациентов после кераторефракционных операций. Часть 2

И.Э. Иошин

ФГБУ «Клиническая больница», ул. Лосиноостровская, д. 45, Москва, 107143, Россия

Качественная реабилитация пациентов с катарактой после ранее проведенных кераторефракционных операций обусловливается корректным расчетом оптической силы ИОЛ для исключения гиперметропической ошибки. ***Цель*** *второй части работы (первую часть см. РОЖ, 2021; 14 (2): 55–58) — представить результаты использования собственного алгоритма расчета оптической силы ИОЛ для факоэмульсификации катаракты (ФЭК) у пациентов после кераторефракционных операций.* ***Материал и методы.*** *Для расчета оптической силы ИОЛ использована оптическая биометрия (ИОЛ-Мастер). Основное направление повышения точности расчета ИОЛ после кераторефракционных операций — введение поправок к стандартным формулам. Предложена альтернатива — использовать формулу Hoffer Q, которая больше соответствует изменениям переднего отрезка миопического глаза после кераторефракционной хирургии, чем другие базовые формулы. Главная особенность формулы Hoffer Q — рефракция роговицы не пересчитывается в радиус кривизны, а применяется непосредственно как оптическая сила «тонкой линзы».* ***Результаты.*** *Эмпирическая персонализированная собственная поправка составила +1 дптр к расчетной планируемой послеоперационной рефракции (у пациентов с исходной миопией от -3 до -9 дптр). Использование принципа «тонкой линзы» позволило в дальнейшем применять данную формулу как после операции ЛАСИК, так и после передней радиальной кератотомии.* ***Заключение.*** *Предложенная методика расчета ИОЛ использована для ФЭК более 200 пациентов после кераторефракционных операций. Ни в одном случае не отмечено гиперметропического сдвига послеоперационной рефракции. Отклонение от запланированной миопической рефракции не превышало 1,0 дптр.*

Ключевые слова: передняя радиальная кератотомия; ЛАСИК; расчет ИОЛ после кераторефракционных операций; факоэмульсификация

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Иошин И.Э. Особенности факоэмульсификации и расчета интраокулярных линз у пациентов после кераторефракционных операций. Часть 2. Российский офтальмологический журнал. 2021; 14 (4): 118-25. https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-4-118-125

Phacoemulsification and calculation of intraocular lenses in patients given keratorefractive surgery. Part 2

Igor E. Ioshin

Clinical Hospital, 45, Losinoostrovskaya St., Moscow, 107143, Russia
atolchinskaya@mail.ru

Effective rehabilitation of patients with cataracts who underwent keratorefractive surgeries requires that the optical power of the IOL be calculated correctly to avoid hyperopic error. The purpose of the 2nd part of the research (for the 1st part, see ROJ, 2021; 14 (2): 55–58) is to present the results of cataract phacoemulsification in patients subjected to keratorefractive surgery based on the author's algorithm for

 © Иошин И.Э., 2021

calculating the optical power of the IOL. ***Material and methods.*** *The algorithm used optical biometry with an IOL-Master device. The main technique of improving the accuracy of IOL calculation after keratorefractive operations has been to introduce amendments to standard IOL calculation formulas. This work proposes an alternative, which consists in using the Hoffer Q formula, as it is more consistent with changes in the anterior segment of the myopic eye after keratorefractive surgery than other basic. The main distinguishing feature of the Hoffer Q formula is that the corneal refraction is not converted into the radius of curvature but is applied directly as the optical power of a "thin lens".* ***Results.*** *The empirical customized correction was +1.0 D with regard to the estimated planned postoperative refraction (for patients with initial myopia from -3 to -9 D). The use of the "thin lens" principle made it possible to extrapolate this formula and apply it after LASIK surgery and after radial keratotomy.* ***Conclusion.*** *The proposed technique of IOL calculation was implemented for cataract phacoemulsification in over 200 patients who underwent keratorefractive surgeries. No cases of hyperopic shift of postoperative refraction were noted. The deviation from the planned myopic refraction did not exceed 1.0 D.*

Keywords: radial keratotomy; LASIK; IOL calculation after keratorefractive operations; phacoemulsification
Conflict of interests: there is no conflict of interests.
Financial disclosure: The author has no financial o property interest in any material or method mentioned.
For citation: Ioshin I.E. Phacoemulsification and calculation of intraocular lenses in patients given keratorefractive surgery. Part 2. Russian ophthalmological journal. 2021; 14 (4): 118-25 (In Russian). https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-4-118-125

Качественная реабилитация с запланированной комфортной послеоперационной рефракцией у пациентов с катарактой после ранее проведенных кераторефракционных операций (лазерный кератомилез *in situ* — ЛАСИК и передняя радиальная кератотомия — ПРК) определяется в первую очередь корректным расчетом оптической силы ИОЛ для исключения гиперметропической ошибки [1, 2].

Настрой пациентов на точное попадание в комфортную рефракцию обусловлен тем, что близорукие пациенты могут успешно адаптироваться в пределах своей миопической рефракционной зоны, но крайне чувствительны к гиперметропическому сдвигу от запланированной рефракции. Кроме этого, пациенты, уже однажды избавленные от близорукости, ориентированы на такой же предсказуемый рефракционный результат после хирургии катаракты, как и после предшествующей рефракционной коррекции зрения в виде эмметропической или слабой миопической рефракции. Это характерно как для пациентов после ЛАСИК, так и после ПРК. Для последних дополнительное значение для качества зрения имеет астигматический компонент в связи с различным по выраженности рубцеванием кератотомических насечек и непредсказуемой сферичностью роговицы в отдаленном послеоперационном периоде.

По достижении определенного возраста (40+) у данных пациентов (через много лет после хирургической коррекции миопии) возможны два основных сценария рефракционных проблем: первый — уменьшение остаточной миопии или даже формирование гиперметропии за счет пресбиопии на фоне формирования помутнений хрусталика. Такая непривычная для близорукого пациента ситуация не всегда удовлетворительно компенсируется пресбиопическими очками. Более того, ситуация может усугубляться гиперкоррекцией, регулярно встречающейся после ПРК. Частая смена очковых линз в отсутствие удовлетворительной остроты зрения и очевидные сложности контактной коррекции у данной категории пациентов побуждают искать хирургические способы решения этих проблем.

Второй сценарий — миопический сдвиг за счет образования характерной для миопии ядерной катаракты. В этих случаях пациент достаточно долго не обращается за помощью, так как уплотнение и потеря прозрачности ядра при данном типе катарактогенеза идет медленно, а адаптация к миопическому сдвигу естественна для близорукого пациента. Именно поэтому достаточно часто пациенты с миопией попадают на факоэмульсификацию (ФЭК) с очень плотным и даже бурым ядром.

В литературе и онлайн-сервисах представлены многочисленные методики расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций, которые постоянно совершенствуются [3–5].

ЦЕЛЬ работы — провести анализ имеющихся и представить собственные подходы к разработке хирургической тактики лечения пациентов с катарактой после наиболее распространенных кераторефракционных операций: ЛАСИК и ПРК, включающий технологию ФЭК и методику расчета оптической силы ИОЛ.

Очевидно, что выбор хирургической технологии с учетом исходного состояния глаза после ПРК — актуальная задача (изложено в первой части статьи [6]), однако основная проблема после кераторефракционной хирургии — трудности расчета оптической силы ИОЛ с учетом особой требовательности пациента с определенным рефракционным анамнезом.

Предоперационное обследование пациентов с катарактой после кераторефракционных операций. Основное предоперационное исследование, необходимое для определения оптической силы ИОЛ: измерение переднезадней оси (ПЗО) с помощью контактной ультразвуковой биометрии — обладает наибольшим потенциалом ошибок. По данным T. Olsen [7], на долю биометрии ПЗО приходится 54 % всех ошибок в расчетах, далее по значимости идет измерение передней камеры (ПК) — 38 % и кератометрия — 8 %. Революционная разработка, получившая название «оптическая биометрия», основана на PCI (partial coherence interferometry, оптическая частично когерентная интерферометрия) 780, 830 и 1055 нм или OLCR (optical low coherence reflectometry, оптическая низкокогерентная рефлектометрия) 820 и 880 нм.

С повсеместным внедрением оптической биометрии точность расчета значительно повысилась, особенно в случаях аметропии за счет бесконтактного принципа измерений и определения оптической, а не анатомической ПЗО. Точность измерений основных параметров (длина ПЗО, глубина ПК, диаметр лимба, оптическая сила передней поверхности роговицы, в последних модификациях приборов — толщина хрусталика, роговицы и оптическая сила задней поверхности роговицы) дает возможность стандартизации и расчета персонализированных коэффициентов. Сравнение точности измерений оптических биометров различных производителей показало минимальные различия показателей: не более 0,01 мм [8].

Одной из особенностей предоперационных измерений у пациентов после кераторефракционных операций счита-

ется заметный разброс показателей кератометрии, который зависит от нескольких факторов. Первостепенное значение имеет нестабильность слезной пленки. В этом случае нередко приходится прибегать к дополнительному увлажнению роговицы перед исследованиями. Данная особенность характерна как для пациентов после ЛАСИК, так и после ПРК.

Другая причина флюктуации кератометрических показателей — механическая нестабильность роговицы, характерная для ее посткератометрических рубцовых изменений. С одной стороны, после операции за счет нарушения каркаса пересеченных на максимальную глубину во время кератотомии всех слоев стромы роговицы по всей окружности достигается эффект изменения ее кривизны, а с другой стороны — формируются побочные эффекты в виде суточных колебаний показателей кератометрии/кератотопографии [9].

Очевидно, что применительно к расчетам оптической силы ИОЛ стабильность показателей роговицы имеет существенное значение. Для повышения точности расчета проводится повторная кератометрия в разное время суток (утро и день). Обычно достаточно повторного кератометрического исследования в течение нескольких дней.

В собственной практике применяется следующий подход. Предполагается, что если флюктуации зрительных функций и показателей кератометрии отмечены до ФЭК, то следует ожидать таких же колебаний и после операции. Можно считать, что определение некой «средней» дооперационной кератометрии достаточно адаптировано для расчета оптической силы ИОЛ при условии отсутствия существенных интраоперационных индуцированных изменений роговицы. Технология бесшовного трансконъюнктивального склеророговичного тоннеля определяет возможность минимального хирургически индуцированного астигматизма. Цель операции ФЭК — оптическая/рефракционная замена хрусталика — достигается, но характерные для пациента флюктуации показателей остаются. Поскольку данные пациенты до операции обычно в течение многих лет применяют слезозаместительную терапию, важно акцентировать их внимание на необходимости ее продолжения и в послеоперационном периоде.

В нашей практике для расчета ИОЛ, в том числе и после кераторефракционных операций, в течение 12 лет используется оптический биометр IOL Master 5, который с учетом персонализированных поправок позволяет получать высокие результаты [10]. Данные кератометрии IOL Master являются основными исходными параметрами для расчета (см. ниже). Кератотопография используется для дополнительной оценки иррегулярности астигматизма.

Расчет оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций. Принципиальные проблемы в расчете оптической силы ИОЛ после ЛАСИК и ПРК основаны на механизме рефракционного эффекта указанных операций, который достигается за счет уплощения передней поверхности роговицы путем уменьшения толщины ее центральной части (ЛАСИК) или за счет увеличения кривизны периферической части роговицы (ПРК).

Поскольку ЛАСИК изменяет кривизну только передней поверхности роговицы, но оставляет кривизну задней поверхности неизменной, то изменяется соотношение передней/задней кривизны роговицы. Так как стандартная кератометрия измеряет только кривизну передней поверхности роговицы, а задняя кривизна экстраполируется на основе стандартного соотношения передней/задней кривизны, то данная экстраполяция становится ошибочной. ПРК уплощает роговицу без изменения ее толщины, но только в небольшой центральной оптической зоне. Эффективный диаметр оптической зоны может быть значительно меньше, чем зона измерения стандартной кератометрии. Поэтому стандартная кератометрия имеет тенденцию переоценивать истинную оптическую силу роговицы.

В соответствии с этим выделяются три основные причины ошибок в расчете ИОЛ после кераторефракционных операций: ошибка измерения радиуса кривизны роговицы, ошибка индекса кератометра и ошибка формулы ИОЛ.

Одна из основных стратегий расчета ИОЛ после кераторефракционных операций заключается в модификации методик, которые применяются для расчета ИОЛ в стандартных ситуациях. В совокупности эти модификации должны включать определение оптической силы видоизмененной роговицы, в том числе и прямое определение кривизны передней и задней поверхности роговицы, коррекцию показаний приборов для кератометрии, учет новой эффективной оптической позиции ИОЛ, введение поправок к стандартным формулам расчета ИОЛ, персонализацию данных.

Ошибка измерения радиуса. Преломляющая сила роговицы, являясь важным исходным параметром для расчета оптической силы ИОЛ, может быть представлена в расчетах радиусом кривизны (мм) или рефракцией роговицы (дптр). В отсутствие технологии прямого измерения оптической силы роговицы кератометры или кератотопографы определяют ее, исходя из радиуса кривизны роговицы, который измеряется не по оптической оси, а несколько парацентрально. Поэтому после кераторефракционной операции по поводу миопии, которая уплощает роговицу максимально в центре, есть риск измерить более крутой (парацентральный) радиус. В этом случае оптическая сила роговицы будет завышена, сила ИОЛ недооценена и пациент может получить гиперметропию. Таким образом, погрешность радиуса зависит от области измерения прибора для кератометрии и от диаметра оптической зоны, на которую воздействовал лазер или которая сформировалась после выполнения радиальных насечек.

Ошибка индекса кератометра связана с тем, что при классической кератометрии или топографии роговицы оптическая сила роговицы определяется путем измерения только передней поверхности роговицы, без учета особенностей ее задней поверхности. Допуск в таком измерении возможен, только если существует фиксированное соотношение между передней и задней кривизной роговицы, потому что только тогда можно рассчитать радиус задней кривизны из переднего радиуса или оптическую силу задней поверхности роговицы из передней. Это соотношение отражается в индексе кератометра, который используется для преобразования измеренного переднего радиуса роговицы в коэффициент преломления роговицы (K): K = индекс кератометра / передний радиус роговицы.

Данное соотношение меняется после кераторефракционной хирургии. Следовательно, индекс кератометра больше не соответствует параметрам глаза и может привести к ошибочным значениям коэффициента преломления роговицы (K) в этих случаях.

Ошибка формулы ИОЛ. Ошибка в применении «традиционной формулы ИОЛ» типична для формул Holladay-1, SRK/T, которые используют радиус кривизны для прогнозирования эффективного положения линзы (ELP). Использование этого показателя в прогнозе ELP в стандартной ситуации оправданно, потому что он представляет в определенной степени геометрию переднего сегмента: плоские роговицы (меньшие радиусы) обычно соответствуют более мелкой ELP, крутые роговицы (большие радиусы) — глубокой ELP [11]. Однако после рефракционной хирургии по поводу миопии плоские роговицы ошибочно связывают с уменьшением ELP, вызывая гиперметропический рефракционный сдвиг у пациентов.

Традиционные методы расчета модели миопического глаза были построены на основе схематического глаза Гульстранда путем увеличения длины заднего отрезка и сохранения неизменным переднего глазного сегмента. Кераторефракционная операция направлена на изменение радиусов кривизны передней части роговицы, чтобы сделать глаз эмметропическим, поэтому расчет на основе «старой» модели вступает в противоречие с «новыми» реалиями.

Согласно данным W. Haigis [12], ошибки значительно меньше для формул Hoffer Q, Haigis и SRK II, но по разным причинам: так, в формуле Hoffer Q для определения ELP рефракция роговицы не переводится при расчете в радиус кривизны, формула Haigis не использует кривизну роговицы в качестве предиктора ELP, а формула SRK II, будучи чисто эмпирической, не дает предсказания ELP (рис. 1).

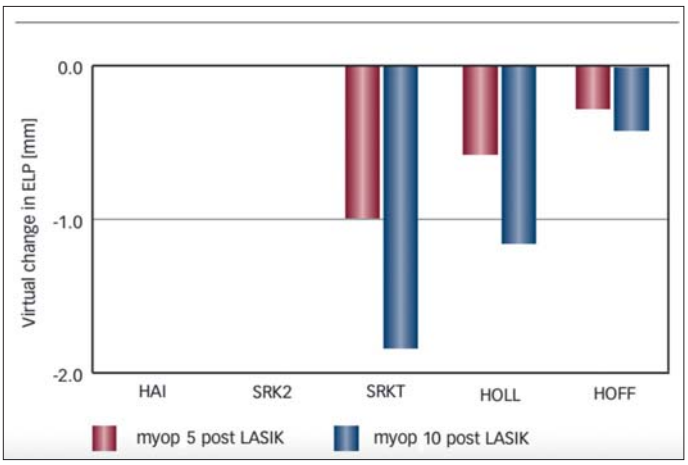


Рис. 1. Ошибка в определении эффективного положения ИОЛ с учетом формулы по Haigis [12]
Fig. 1. Error in determining the effective IOL position taking into account the Haigis formula [12]

Выбор формулы для расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций. Совершенствование и модификации формул расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций направлены на коррекцию или устранение описанных выше ошибок измерения и расчета. Одно из первых направлений — моделирование и расчет оптической силы роговицы с помощью жесткой контактной линзы. Суть метода состоит в том, что жесткую линзу помещают на поверхность роговицы, предварительно определив манифестную рефракцию, затем величину изменения рефракции вычитают из основной кривизны контактной линзы (КЛ). Например, если после установки КЛ с основной кривизной Кл = А дптр рефракция глаза не изменилась, то преломляющая сила роговицы в оптическом центре составляет также А дптр. Изменение рефракции на Δ дптр в сторону миопии означает, что кривизна передней поверхности роговицы меньше, чем основная кривизна КЛ, на Δ дптр. При изменении рефракции в сторону гиперметропии величина Δ прибавляется к основной кривизне КЛ: Кр = Кл – Δ = А дптр – /+ Δ дптр. Точность метода оспаривается. Кроме того, его применение возможно только при сохранении достаточно высокой остроты зрения.

Широко распространился метод «рефракционной истории», суть которого в расчете сферического эквивалента до (KPRE) и после рефракционной операции (KPOST), в дальнейшем разница между ними (RCC) вычитается из предоперационной оптической силы роговицы [13].

Отсутствие объективных данных до проведения рефракционной операции дало толчок развитию регрессивных формул (S. Masket, Koch и Wang, Shammas) с эмпирическими поправками для корректного расчета [13].

В отечественной практике применялись способы расчета оптической силы ИОЛ после ПРК, которые включали измерение радиуса кривизны передней поверхности роговицы, ПЗО и вычисление разницы сферического эквивалента очковой коррекции до и после ПРК [14], а также определение кератотопографических показателей периферической части роговицы, по которым реконструировалась ее центральная часть [9]. Полученные данные использовались в формулах 3-го поколения (SRK/T).

Оригинальное решение в виде Double-K Formulae было предложено J. Aramberri [15], которое сочетает «исторический» метод и ситуации в отсутствие исходных данных. Формула расчета ИОЛ была изменена, чтобы использовать K-значение до рефракционной хирургии (Kpre) для вычисления эффективного положения линзы (ELP) и K-значение после рефракционной хирургии (Kpost) для вычисления силы ИОЛ по формуле. Значение Kpre было получено с помощью кератометрии или топографии, а Kpost — на основе истории болезни. В отсутствие данных до операции используется эмпирически рассчитанная поправка к формулам SRK/T, Holladay, Hoffer Q (рис. 2).

Методика двойной кератометрии
доступна для формул SRK/T, Holladay I,II, Hoffer Q

На основе метода Арамберри «Двойной К» числа в каждом ряду рефракционной коррекции MYOPIC представля
поправку, которую необходимо прибавить к рассчитанной мощности ИОЛ при использовании обычных формул

Исходная миопия (D)	Длина глаза (мм) 20	22	24	26	28	30
2	0,4	0,3	0.2	0.2	0,1	0.0
3	0.6	0,5	0,3	0,3	0.2	0.0
4	0.8	0.6	0,5	0,3	0.2	0.0
5	1,0	0.8	0.6	0,4	0,3	0.0
6	1.2	0.9	0.7	0,5	0,4	0,1
7	1.4	1,1	0.8	0.6	0,5	0,1
8	1,6	1.2	1,0	0.7	0.6	0.2
9	1,7	1,3	1,1	0.8	0.7	0.2
10	1,9	1,5	1.2	1,0	0.7	0,3

Для формулы Hoffe

Рис. 2. Эмпирическая поправка к формуле Hoffer Q при методике двойной кератометрии [15]
Fig. 2. Empirical correction to the Hoffer Q formula for double keratometry [15]

Формула W. Haigis [12] отличается расчетом актуального радиуса роговицы, построенного на эмпирической зависимости данных IOL Master с учетом трех констант (оптическая глубина ПК — ACD — α1, оптический размер ПЗО — AL — α2, дополнительная расчетная константа — α0). Это позволяет оптимизировать все три константы для широкого диапазона ПЗО и ПК с использованием анализа двойной регрессии. В итоге эффективная позиция ИОЛ — ELP рассчитывается по формуле: ELP = α0 + (α1 * ASD) + (α2 * AL), где расчет минимально зависит от измененного профиля роговицы.

Перспективным направлением повышения точности расчета ИОЛ считается прямое измерение кривизны передней и задней поверхности роговицы, что принципиально учитывает изменения после кераторефракционных операций. Такие измерения возможны несколькими способами — это ротационная schempflug-регистрация (прибор

Pentacam, особенно в комбинации с оптической биометрией — Pentacam AXL), а также прямое оптическое измерение передней и задней поверхности роговицы при оптической когерентной томографии — ОКТ (IOL Master 700), сочетающее оптическую биометрию и ОКТ. Метод получил название Total K (keratometry) — тотальная кератометрия (TK) с помощью swept-source OCT (оптическая передняя и задняя кератометрия, а также определение толщины роговицы) биометра IOL Master 700 (Carl Zeiss). Отмечено различие в стандартной и тотальной кератометрии, которое составило 0,39 D ($p < 0,05$) после миопического ЛАСИК и 0,15 D ($p < 0,05$) после ПРК [5].

Формула Barrett True-K также была разработана для глаз с предшествующими кераторефракционными операциями [1]. Она определяет кератометрию и изменение рефракции вследствие рефракционной операции (когда доступны данные — «исторический» метод). В отсутствие «исторических» данных для определения задней поверхности роговицы используют по умолчанию в режиме прогнозирования теоретическую модель Predicted PCA для индивидуального глаза (рис. 3, А). В качестве альтернативы можно использовать для расчета результаты прямых измерений задней кривизны роговицы с использованием Scheimpflug (Pentacam AXL) или Swept Source OCT (IOL Master 700) (рис. 3, Б).

Таким образом, существуют множество формул, которые предназначены для расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций, сочетающих различные эмпирические поправки и анамнестические данные, основанные на различных параметрах и методах измерения, учитывающие данные конкретных приборов и т. д. Для максимального удобства большинство из них объединены в онлайн-калькуляторах: http://iol.ascrs.org/; http://www.eyelab.com/; http://www.hofferprograms.com/IOLPower/HofferSaviniTool.aspx; http://doctor-hill.com/iol-master/iolmaster_main.htm. Вместе с тем рекомендуемый расчет оптики ИОЛ имеет разброс по различным методикам до 1 дптр и более (рис. 4, А, Б).

Тем не менее наличие разброса рекомендуемой оптической силы ИОЛ в онлайн-калькуляторах несколько дезориентирует в окончательном выборе. Необходимо отметить, что особенность расчета основных «формул-доноров» (формулы 3-го поколения) ИОЛ с последующим внедрением эмпирических персональных добавок заключается в преобразовании оптической силы роговицы в последующие математические вычисления эффективного положения ИОЛ (рис. 5).

Как уже было отмечено выше, в SRK/T и Holladay по значению рефракции роговицы вычисляется ее радиус кривизны, который применяется в оптической формуле расчета ИОЛ. На основании радиуса кривизны роговицы вычисляется высота роговичного сегмента для прогнозирования положения ИОЛ. Вычисленное значение высоты роговичного сегмента используется в совокупности с А-константой ИОЛ и ПЗО для

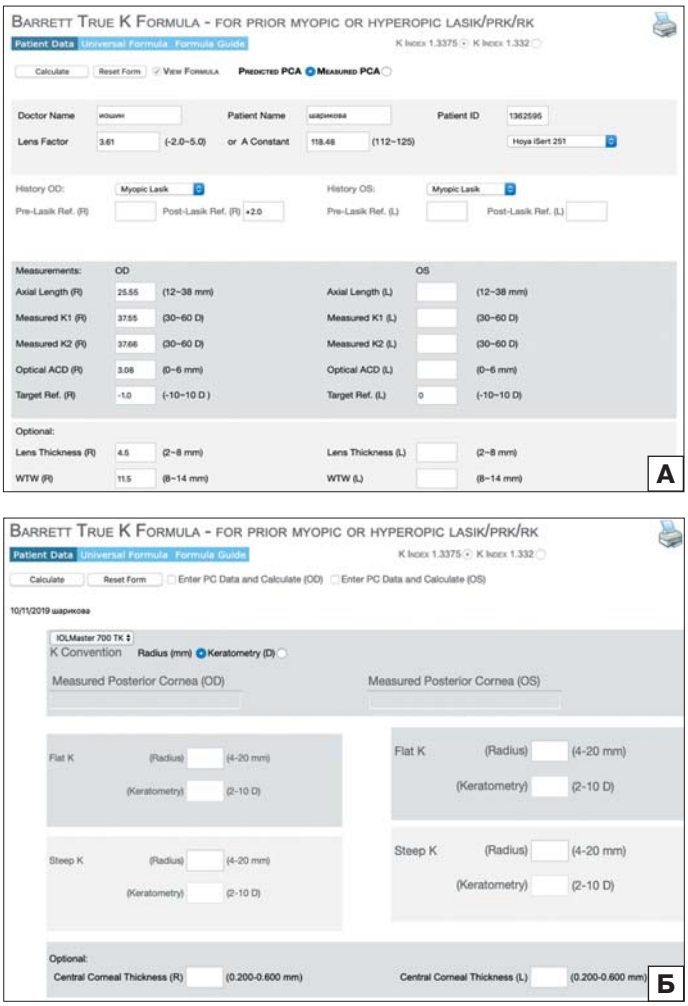


Рис. 3. Расчет ИОЛ с помощью формулы Barrett True-K (А, Б)
Fig. 3. IOL calculation using Barrett True-K formula (А, Б)

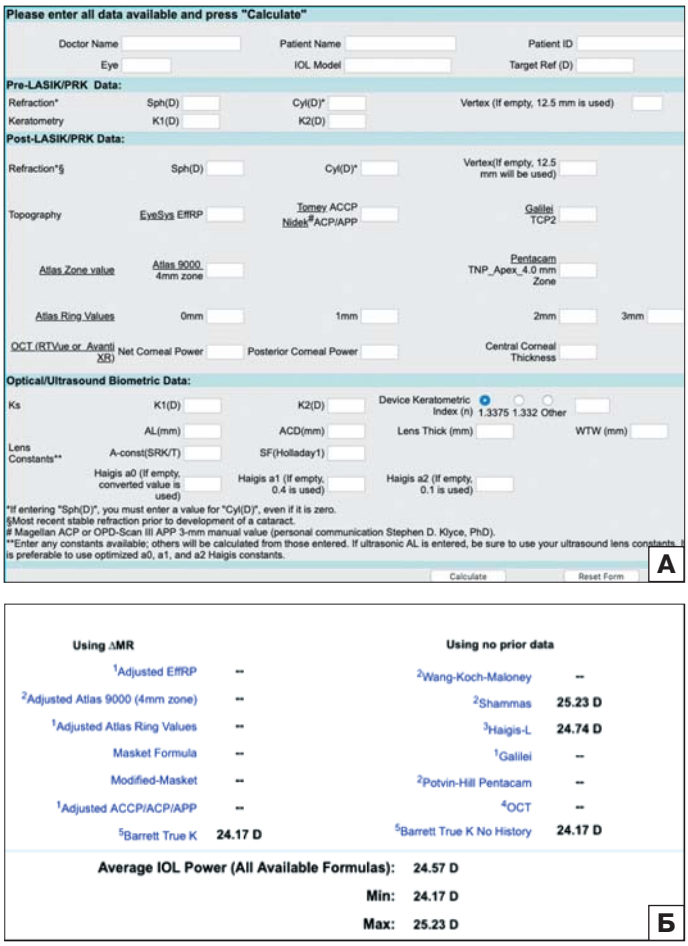
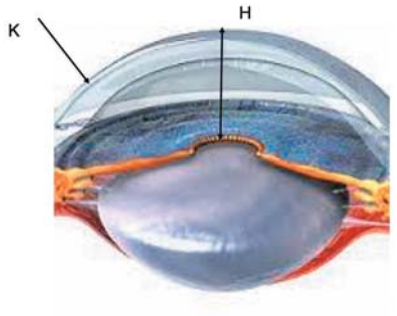


Рис. 4. Веб-сайт ASCRS. Калькулятор ИОЛ после ЛАСИК и после ПРК (А, Б)
Fig. 4. ASCRS website (website based post-LVC and post-RK IOL calculator): http://iol.ascrs.org/ (А, Б)



SRK/T:
ELP = H + AConst

Holladay:
ELP = H + SF(A)

HofferQ:
ELP = tg(K) –
функция с плавной
зависимостью от K

Рис. 5. Расчет эффективного положения ИОЛ: K — рефракция роговицы; A — константа A; SF — хирургический фактор; ELP — прогнозируемое значение положения ИОЛ относительно вершины роговицы; H — вычисленная (по K) высота роговичного шарового сегмента

Fig. 5. Feature of calculating the effective position of the IOL: K — corneal refraction; A — constant A; SF — surgical factor; ELP is the predicted value of the IOL position relative to the apex of the cornea, H — calculated (by K) height of the corneal spherical segment

прогнозирования положения ИОЛ — расстояния от ИОЛ до вершины роговицы. Очевидно, что погрешность расчета при переводе рефракции в радиус кривизны в случаях изменения соотношения передней и задней поверхностей возрастает.

В нескольких формулах H не высчитывается из рефракции роговицы, а определяется эмпирическими поправками, что позволило получить более высокие результаты. В частности, Haigis, как показано выше, для расчета ELP использует оптическую глубину ПК и ПЗО по данным оптической биометрии и эффективно применяет после ЛАСИК. В свою очередь, SRKII представляет полностью эмпирическую формулу без определения ELP, поэтому, с одной стороны, лишена ошибок в ее определении и используется в расчете оптической силы ИОЛ после ПРК [16, 17], с другой стороны, точность SRKII в широкой офтальмологической практике оказалась невысокой, что привело к отказу от нее большинства хирургов.

С учетом многих публикаций о точных результатах расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций при использовании формулы Hoffer Q [18] был проведен анализ ее особенностей и оценка возможности применения в практике [19]. Отличительная особенность формулы Hoffer Q состоит в том, что рефракция роговицы не пересчитывается в радиус кривизны, а применяется непосредственно как оптическая сила тонкой линзы. Принципиальным моментом выбора формулы Hoffer Q стала математическая особенность расчета рефракции. Для прогнозирования положения ИОЛ относительно роговицы применяется не геометрическая формула расчета высоты роговичного сегмента, а эмпирическая зависимость, построенная по данным Hoffer. В регрессионной формуле Hoffer Q для прогнозирования положения ИОЛ наряду с зависимостью от ПЗО присутствует зависимость от рефракции роговицы в виде тригонометрической функции (tg). Эта математическая находка Hoffer удобна для расчета эмпирической поправки, так как при угле 45°–30° в сферической модели, что соответствует диапазону оптической силы роговицы после рефракционной операции, значение tg плавно уменьшается (рис. 6). В условиях измененной после рефракционной операции формы роговицы методика Hoffer должна быть более точной в связи с применением в расчетах значений рефракции роговицы в виде плавно меняющейся функции tg, а не пересчета и использования в геометрических и оптических формулах значений радиуса кривизны.

Такое принципиальное отличие позволяет рекомендовать формулу Hoffer Q в качестве альтернативной или проверочной формулы для пациентов после рефракционных операций. Собственная эмпирическая персонализированная поправка была рассчитана по результатам ФЭК 60 пациентов после ЛАСИК при исходной миопии от -3 до -9 дптр и составила +1 дптр к расчетной планируемой послеоперационной рефракции [20]. Использование принципа «тонкой линзы» позволило в дальнейшем применять данную формулу как после ЛАСИК, так и после ПРК, в отличие от многих других формул (рис. 7).

В результате анализа доступных методов расчета оптики ИОЛ (отклонение от запланированной рефракции, по данным различных публикаций, математических и геометрических особенностей расчета) был предложен следующий алгоритм. Он заключается в предварительном расчете оптической силы по различным формулам с использованием калькулятора http://iol.ascrs.org/, которая попадает в опреде-

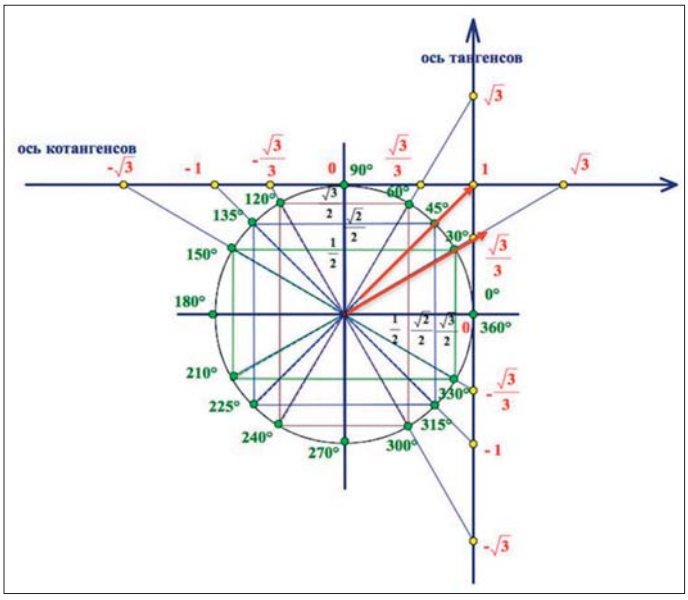


Рис. 6. Сферическая модель, где тангенс углов от 30° до 45°, соответствующий диапазону рефракции роговицы после кераторефракционной операции, плавно изменяется от √3/3 (= 0,57) до 1

Fig. 6. The spherical model, where the tangent of the angles from 30° to 45°, corresponding to the corneal refraction range after keratorefractive surgery, smoothly changes from √3/3 (= 0,57) to 1

Formula or nomogram	Input	Post-laser vision correction	Post-radial keratotomy
Double K formula	True K	Yes	Yes
Hoffer Q formula	True K	Yes	Yes
Haigis-L formula	Standard K	Yes	No
Masket formula	True K	Yes	No
Koch and Wang nomogram adjustment	True K	Yes	No

Table 2. Intraocular lens power formula or nomogram suitable for post-refractive surgery cases

Рис. 7. Возможности применения различных формул расчета ИОЛ после кераторефракционных операций (по [12])

Fig. 7. Possibility of using different formulas for IOL calculation after keratorefractive operations (according to [12])

ленный диапазон значений. Затем проводился расчет ИОЛ по проверочной формуле Hoffer Q: планируемая оптическая сила ИОЛ должна соответствовать послеоперационной рефракции + 1 дптр в виде собственной эмпирической поправки. Выбор итоговой оптической силы ИОЛ после сравнения двух расчетов осуществляется с предпочтением большей оптической силы ИОЛ.

За 10 лет активного применения описанной технологии расчета ИОЛ после кераторефракционных операций прооперировано более 200 пациентов. Ни в одном случае не отмечено гиперметропического сдвига после операционной рефракции (чаще всего предпочтение отдавалось проверочной формуле). Отклонение запланированной рефракции не превышало 0,75 дптр [10]. Данная методика применяется у пациентов с исходной миопий от 3 до 9 дптр. Все исходные данные получены на приборе IOL Master 5.

Клинический пример 1. Пациентка А., 39 лет. В анамнезе OU — миопия средней степени, ЛАСИК в 2001 г., данные недоступны. Снижение остроты зрения и трудности использования очковой коррекции обоих глаз отмечены в течение последних трех лет. Объективно — ядерная катаракта. До операции: острота зрения OD = 0,05 sph — 9,0 cyl — 2,0 ax 10 = 0,4; OS = 0,05 sph — 7,0 cyl — 2,0 ax 160 = 0,3. Кератометрия (Canon) OD = 37,00 ax 17 — 38,75 ax 107; OS = 35,50 ax 156 — 37,25 ax 66. Оптическая биометрия: OD — AL 30,59 мм, K1 36,25 D, K2 37,84 D cyl — 1,59 ax 9° ACD 3,48; OS — AL 30,46 мм, K1 34,83 D, K2 35,83 D cyl 1 — 1,00 ax 166° ACD 3,52.

Расчет по согласованию с пациенткой на послеоперационную рефракцию — (-2,0).

Данные из онлайн-калькулятора. OD — средняя сила ИОЛ HOYA model 251isert — 16,35 дптр (15,76–17,25 дптр); OS — средняя сила ИОЛ HOYA model 251isert — 19,7 дптр (18,78–19,91 дптр).

Контрольный расчет на ИОЛ-Мастере. Расчет по формуле Hoffer Q на -2 дптр послеоперационной рефракции на OD соответствует силе ИОЛ HOYA model 251isert +13,5 дптр с дополнительной эмпирической +1 дптр, а на OS соответствует силе ИОЛ HOYA model 251isert +16,5 дптр с дополнительной эмпирической +1 дптр = +17,5 дптр (итоговая сила ИОЛ).

Проведена ФЭК на обоих глазах с интервалом 5 дней. Имплантирована ИОЛ HOYA model 251 OD +15,00 дптр (+1 к запланированной рефракции); OS +17,5дптр (+1 к запланированной рефракции).

Данные после операции (отдаленный период). Острота зрения OD = 0,3 sph — 2,0 cyl н/к = 0,6; OS = 0,3 sph — 2,0 cyl н/к = 0,5. Кератометрия (Canon) OD = 37,00 ax 15 — 38,75 ax 105; OS = 35,00 ax 156 — 37,25 ax 66.

Клинический пример 2. Пациент Б., 58 лет. В анамнезе OU — миопия средней степени, ПРК в 1993 г., данные недоступны. Снижение зрения OD отмечено в течение последних пяти лет. Объективно — кортикальная катаракта. До операции: острота зрения OD = 0,05 н/к; OS = 0,05 cyl — 1,0 ax 50 = 0,8. Кератометрия (Canon) OD = 35,25 ax 86 — 36,62 ax 176; OS = 35,50 ax 156 — 37,25 ax 66. Оптическая биометрия: OD = AL 27,16 мм, K1 33,78 D, K2 36,45D cyl — 2,67 ax 88° ACD 3,28 мм. Расчет по согласованию с пациентом — на эмметропию.

Расчет по онлайн-калькулятору: HOYA model 251isert +21,8D (разброс данных 21,3–22,3 дптр). Расчет по формуле Hoffer Q на эмметропию послеоперационной рефракции соответствует силе ИОЛ HOYA model 251isert +22,0 дптр + 1 дптр = +23,0 дптр (итоговая сила ИОЛ).

Проведена ФЭК на OD. Имплантирована ИОЛ HOYA model 251 OD +23,00 дптр (+1 к запланированной рефракции).

Данные после операции (отдаленный период). Острота зрения OD = 0,9. Кератометрия (Canon) OD = 34,62 ax 72 — 35,25 ax 162.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность расчета оптической силы ИОЛ после кераторефракционных операций считается главной особенностью пациентов указанной группы с учетом их особой требовательности к послеоперационной рефракции. Сложившаяся практика расчета ИОЛ с помощью онлайн-калькуляторов дает определенную уверенность в достижении запланированной рефракции, так как учитывает возможность использования различных диагностических измерительных приборов и основывается на различных эмпирических авторских поправках. Вместе с тем существующий разброс рекомендуемой оптической силы, достигающий 1,0 и более дптр, возможно, определяется особенностью математических преобразований при перерасчете оптической силы роговицы (рефракция роговицы, радиус кривизны роговицы). Хорошую перспективу открывает возможность прямого определения задней кривизны роговицы для учета измененного соотношения с передней поверхностью, что справедливо считается основной причиной ошибок в определении ELP — эффективного положения ИОЛ. Вместе с тем переход на данный метод расчета требует закупки приборов нового поколения, что доступно не всем практикующим хирургам.

Собственное предложение о проверочном расчете с помощью формулы Hoffer Q основано на особенности оценки в ней роговицы как «тонкой линзы», на которую изменения передней и задней кривизны роговицы влияют минимально. Дополнительно использование формулы Hoffer Q, которая, как известно, рекомендована для глаз с гиперметропией, больше соответствует изменениям переднего отрезка глаза после кераторефракционной хирургии, в отличие от других базовых формул для миопического глаза, которые основаны на увеличении длины заднего сегмента глаз при неизменном переднем отрезке. Формула Hoffer Q потенциально способна устранить это противоречие «старой» модели расчета с «новыми» реалиями переднего отрезка глаза. Более того, указанный принцип «тонкой линзы» и плавная тригонометрическая корреляционная зависимость позволяют применять формулу Hoffer Q с тем же поправочным коэффициентом как после ЛАСИК, так и после ПРК.

Анализ существующих методов расчета оптики ИОЛ послужил основой для разработки собственного алгоритма. Он заключается в предварительном расчете оптической силы по различным формулам с использованием онлайн-калькулятора http://iol.ascrs.org/, которая попадает в определенный диапазон значений. Затем проводится расчет ИОЛ по проверочной формуле Hoffer Q: планируемая оптическая сила ИОЛ должна соответствовать послеоперационной рефракции + 1 дптр в виде собственной эмпирической поправки. Выбор итоговой оптической силы ИОЛ после сравнения двух расчетов осуществляется с предпочтением большей оптической силы ИОЛ. За 10 лет активного применения описанной технологии расчета ИОЛ после кераторефракционных операций прооперировано более 200 пациентов. Ни в одном случае не отмечено гиперметропического сдвига послеоперационной рефракции (чаще всего предпочтение отдавалось проверочной формуле). Отклонение запланированной рефракции не превышало 0,75 дптр [10]. Данная методика применяется у пациентов с исходной миопий от -3 до -9 дптр. Все данные получены на приборе IOL Master.

Результаты, полученные автором, не предназначены для медицинского или хирургического инструктажа и

не являются окончательными; автор не гарантирует, что результаты будут точными в каждом случае. Врачи должны следовать своим собственным независимым представлениям о надлежащем лечении своих пациентов и нести исключительную ответственность за рефракционный результат операции.

Литература/References

1. *Abulafia A., Hill W.E., Koch D.D., Wang L., Barrett G.D.* Accuracy of the Barrett True-K formula for intraocular lens power prediction after laser in situ keratomileusis or photorefractive keratectomy for myopia. J. Cataract. Refract. Surg. 2016; 42: 363–9. https://doi:10.1016/j.jcrs.2015.11.039
2. *Fram N.R., Masket S., Wang L.* Comparison of intraoperative aberrometry, OCT-based IOL formula, Haigis-L, and Masket formulae for IOL power calculation after laser vision correction. Ophthalmology. 2015; 122: 1096–1101. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2015.01.027
3. *Shammas H.J., Shammas M.C.* No-history method of intraocular lens power calculation for cataract surgery after myopic laser in situ keratomileusis. J. Cataract Refract. Surg. 2007; 33: 31–6. https://doi:10.1016/j.jcrs.2006.08.045
4. *Rosa N., Capasso L., Lanza M., et al.* Reliability of a new correcting factor in calculating intraocular lens power after refractive corneal surgery. J. Cataract Refract. Surg. 2005; 31: 1020–4. https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2004.10.055
5. *Wang L., Booth M.A., Koch D.D.* Comparison of intraocular lens power calculation methods in eyes that have undergone LASIK. Ophthalmology. 2004; 111: 1825–31. https://doi:10.1016/j.ophtha.2004.04.022
6. *Иошин И.Э.* Особенности факоэмульсификации и расчета интраокулярных линз у пациентов после кераторефракционных операций. Часть 1. Российский офтальмологический журнал. 2021; 14 (2): 55–8. [*Ioshin I.E.* Phacoemulsification and calculation of intraocular lenses in patients given keratorefractive surgery. Part 1. Russian ophthalmological journal. 2021; 14 (2): 55–8 (In Russian)]. https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-2-55-58
7. *Olsen T.* Sources of error in intraocular lens power calculation. J. Cataract Refract. Surg. 1992 Mar; 18 (2): 125–9. doi: 10.1016/s0886-3350(13)80917-0
8. *Киселева Т.Н., Романова Л.И., Оганесян О.Г., Милаш С.В., Пенкина А.В.* Оптическая биометрия глаза: принцип и диагностические возможности метода. Российская педиатрическая офтальмология. 2016; 12 (1): 35–42. [*Kiselyova T.N., Romanova L.I., Oganesyan O.G., Milash S.V., Penkina A.V.* Optical eye biometry: principle and diagnostic capabilities of the method. Rossijskaya pediatricheskaya oftal'mologiya. 2016; 12(1): 35–42 (in Russian)]. http://dx.doi.org/10.18821/1993-1859-2017-12-1
9. *Ходжаев Н.С., Богуш И.В.* Методы устранения рефракционных ошибок при расчете силы интраокулярной линзы после кераторефракционных операций. Офтальмохирургия. 2010; 2: 51–4. [*Khodzhaev N.S., Bogush I.V.* Methods of refractive errors eliminating in intraocular lens power calculation after corneal refractive surgery (review). Fyodorov journal of ophthalmic surgery. 2010; 2: 51–4 (In Russian)].
10. *Иошин И.Э.* Интраокулярная коррекция афакии. Москва: Апрель; 2014. [*Ioshin I.E.* Intraocular correction of aphakia. Moscow: April; 2014 (In Russian)].
11. *Куликов А.Н., Кокорева Е.В., Дзилихов А.А.* Эффективная позиция линзы. Обзор. Офтальмохирургия. 2018; 1: 92–7. [*Kulikov A.N., Kokareva E.V., Dzilikhov A.A.* Effective lens position. A review. Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2018; (1): 92–7 (In Russian)]. https://doi.org/10.25276/0235-4160-2018-1-92-97
12. *Haigis W.* Intraocular lens calculation after refractive surgery for myopia: Haigis-L formula. J. Cataract. Refract. Surg. 2008; 34: 1658–63. https://doi: 10.1016 / j. jcrs.2008.06.029
13. *Holladay J.T.* Cataract surgery in patients with previous keratorefractive surgery (RK, PRK, and LASIK). Ophthalmic Pract. 1997; 15: 238–44.
14. *Стахеев А.А., Балашевич Л.И.* Новый метод расчета силы интраокулярных линз для пациентов с катарактой, перенесших ранее радиальную кератотомию. Офтальмохирургия. 2008; 2: 26–33. [*Stakheev A.A., Balashevich L.I.* A new method of calculating intraocular lens power for patients with cataract undergone previously radial keratotomy. Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2008; 2: 26–33 (In Russian)].
15. *Aramberri J.* Intraocular lens power calculation after corneal refractive surgery: double-K method. J. Cataract Refract. Surg. 2003; 29: 2063–8. https:// doi:10.1016 / s0886-3350(03)00957-x
16. *Li W., Spektor T., de Souza R.G., Koch D.D.* Evaluation of total keratometry and its accuracy for intraocular lens power calculation in eyes after corneal refractive surgery. J. Cataract. Refract. Surg. 2019; 45: 1416–21. https://doi. org/10.016/j.jcrs.2019.05.020
17. *Беликова Е.И.* Интраокулярная коррекция пресбиопии и астигматизма у пациентов после LASIK и радиальной кератотомии. Офтальмохирургия. 2011; 3: 5–8. [*Belikova E.I.* Intraocular correction of presbyopia and astigmatism in patients after LASIK and radial keratotomy. Fyodorov journal of ophthalmic surgery. 2011; 3: 5–8 (In Russian)].
18. *Hoffer K.J.* Intraocular lens power calculation after previous laser refractive surgery. J. Cataract. Refract. Surg. 2009; 35 (4): 759–65. https://doi. org/10.1016/j.jcrs.2009.01.005
19. *Brandsdorfer A., Kang J.J.* Improving accuracy for intraocular lens selection in cataract surgery. Curr. Opin. Ophthalmol. 2018; 29 (4): 323–7. https:// doi:10.1097/ICU.0000000000000493
20. *Иошин И.Э., Хачатрян Г.Т., Виговский А.В.* Расчет оптической силы ИОЛ после кераторефракционной хирургии. Рефракционная хирургия и офтальмология. 2006; 6 (2): 28–32. [*Ioshin I.E., Khachatryan G.T., Vigovskij A.V.* Calculation of the optical power of IOL after keratorefractive surgery. Refrakcionnaya khirurgiya i oftal'mologiya. 2006; 6 (2): 28–32 (In Russian)].

Поступила: 17.02.2021. Переработана: 20.04.2021. Принята к печати: 25.04.2021
Originally received: 17.02.2021. Final revision: 20.04.2021. Accepted: 25.04.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ/INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

ФГБУ «Клиническая больница», ул. Лосиноостровская, д. 45, Москва, 107143, Россия
Игорь Эдуардович Иошин — д-р мед. наук, профессор, руководитель центра офтальмологии
Для контактов: Игорь Эдуардович Иошин,
atolchinskaya@mail.ru

FSBU Clinical Hospital, 45, Losinoostrovskaya St., Moscow, 107143, Russia
Igor E. Ioshin — Dr of Med. Sci., professor, head of the ophthalmology department of the center for ophthalmology
Contact information: Igor E. Ioshin,
atolchinskaya@mail.ru