ОБЗОРЫ

УДК: 617.741–089.843:617.753.2–089.844

Мякушкина Руслана Рашидовна – соискатель
Юсупов Азамат Фархадович – д.м.н., профессор
Каримова Муяссар Хамитовна – д.м.н., профессор
Гельманова Татяна Ивановна – офтальмохирург
Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр микрохирургии глаза (Ташкент, Узбекистан)
Муханов Шавкат Абдувалиевич – к.м.н.
СП ООО "SIHAT KO'Z" (Ташкент, Узбекистан)

АКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЁТА ИОЛ У ПОСТРЕФРАКЦИОННЫХ ПАЦИЕНТОВ С МИОПИЕЙ

Аннотация. *Рост числа пациентов, ранее перенёсших LASIK и PRK, делает задачу точного расчёта ИОЛ всё более значимой. У таких пациентов классические формулы часто дают ошибки из-за изменения кривизны и асферичности роговицы, а также неточного прогноза положения линзы. Это снижает предсказуемость рефракционного результата и удовлетворённость пациентов. Современные методы — Barrett True-K, ray tracing, Hill-RBF, EVO 2.0 — обеспечивают более высокую точность и персонализированный подход, что подтверждает актуальность исследования.*

Ключевые слова*. Интраокулярная линза; расчёт ИОЛ; миопия; LASIK; PRK; пострефракционные глаза; Barrett True-K; трассировка лучей; искусственный интеллект; персонализированный подход; катарактальная хирургия.*

Myakushkina Ruslana Rashidovna – mustaqil izlanuvchi
Yusupov Azamat Farxadovich – t.f.d., professor
Karimova Muyassar Xamitovna – t.f.d., professor
Gelmanova Tatyana Ivanovna – oftalmoxirurg
Respublika ixtisoslashtirilgan ko‘z mikroxirurgiyasi ilmiy-amaliy tibbiyot markazi (Toshkent, O‘zbekiston)
Muxanov Shavkat Abduvaliyevich – t.f.n.
SP MChJ "SIHAT KO'Z" (Toshkent, O‘zbekiston)

MIYOPIYALI POSTREFRAKSION BEMORLARDA IOL HISOBLASHNING ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALARI

Annotatsiya. *Avval LASIK yoki PRK operatsiyalarini o‘tkazgan bemorlar sonining ortib borishi IOL hisoblashning aniqligini ta’minlash vazifasini yanada dolzarb qilmoqda. Bunday bemorlarda klassik formulalar ko‘pincha xatoliklarga olib keladi, chunki ragonitsaning qiyaligi va asferikligi o‘zgargan bo‘ladi, shuningdek, IOL joylashuvini oldindan aniq prognoz qilish qiyinlashadi. Bu esa refraksion natijaning oldindan aytib bo‘ladiganligini pasaytiradi va bemorlar qoniqishiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Zamonaviy usullar — Barrett True-K, ray tracing, Hill-RBF, EVO 2.0 — yuqori aniqlik va shaxsga yo‘naltirilgan yondashuvni ta’minlaydi, bu esa mazkur mavzuning ilmiy va amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi.*

Kalit so‘zla*r: Intraokulyar linza; IOL hisoblash; miyopiya; LASIK; PRK; postrefraksion ko‘zlar; Barrett True-K; nur yo‘li bo‘yicha hisoblash; sun’iy intellekt; shaxsiylashtirilgan yondashuv; katarakt jarrohligi.*

Myakushkina Ruslana Rashidovna – independent researcher
Yusupov Azamat Farxadovich – D.M.Sc., professor
Karimova Muyassar Khamitovna – D.M.Sc., professor
Gelmanova Tatyana Ivanovna – ophthalmic surgeon
Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center of Eye Microsurgery (Tashkent, Uzbekistan)
Mukhanov Shavkat Abduvaliyevich – C.M.Sc.
SP LLC "SIHAT KO'Z" (Tashkent, Uzbekistan)

CURRENT TECHNOLOGIES FOR IOL POWER CALCULATION IN POST-REFRACTIVE MYOPIC PATIENTS

Abstract*. The increasing number of patients who previously underwent LASIK or PRK makes the task of accurate IOL power calculation more relevant than ever. In such cases, traditional formulas often yield errors due to altered corneal curvature and asphericity, as well as difficulties in predicting the effective lens position. These factors reduce the predictability of refractive outcomes and overall patient satisfaction. Modern methods — Barrett True-K, ray tracing, Hill-RBF, and EVO 2.0 — provide higher accuracy and a more personalized approach, highlighting the significance of further research in this area.*

Keywords: *Intraocular lens; IOL calculation; myopia; LASIK; PRK; post-refractive eyes; Barrett True-K; ray tracing; artificial intelligence; personalized approach; cataract surgery.*

За последние десятилетия катарактальная хирургия трансформировалась из процедуры, направленной лишь на удаление помутневшего хрусталика, в высокотехнологичную рефракционную операцию, основной целью которой является достижение максимально точного зрительного результата и независимость пациента от очковой коррекции. Современные тенденции в офтальмохирургии обусловлены ростом числа пациентов, ранее перенёсших лазерные рефракционные вмешательства — LASIK, LASEK, PRK. По данным международных регистров, к 2030 году доля таких пациентов среди кандидатов на имплантацию ИОЛ может превысить 20 % (Hoffer et al., 2024; Day et al., 2023). После миопической лазерной аблации происходит значительное изменение геометрии роговицы: уменьшается передняя кривизна, изменяется асферичность и соотношение передней и задней поверхностей. Эти факторы нарушают математические зависимости, заложенные в классические формулы расчёта ИОЛ (SRK/T, Holladay 1, Hoffer Q), которые исходно предполагали неизменность корнеальной геометрии и постоянное соотношение между кератометрическими значениями и эффективным положением линзы (Effective Lens Position, ELP) (Savini et al., 2021; Wang & Koch, 2022). В результате послеоперационный рефракционный результат у таких пациентов часто сопровождается систематической гиперметропической ошибкой (Barrett et al., 2023). Сложность прогнозирования рефракционного исхода после имплантации ИОЛ у пациентов с миопией после LASIK или PRK остаётся одной из актуальных проблем современной офтальмохирургии. В ответ на эту задачу в последние годы активно развиваются специализированные алгоритмы расчёта оптической силы ИОЛ — Haigis-L, Shammas, Barrett True-K, а также методы, основанные на трассировке лучей и данных оптической когерентной томографии (OCT). Их сравнительная эффективность, а также факторы, влияющие на точность расчёта, остаются предметом интенсивных исследований и обсуждений (Cione et al., 2023; Gettinger et al., 2024; Aramberri et al., 2025).

Провести анализ современных подходов к расчёту оптической силы интраокулярной линзы (ИОЛ) у пациентов с миопией, ранее перенёсших лазерные рефракционные операции (LASIK, PRK); выявить основные источники ошибок традиционных методик и оценить эффективность новых алгоритмов, основанных на трассировке лучей и технологиях искусственного интеллекта. Проведён аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций за период 2008–2025 гг., посвящённых расчёту ИОЛ у пациентов после рефракционных вмешательств. Рассмотрены классические формулы (SRK/T, Hoffer Q, Holladay 1), специализированные no-history-формулы (Haigis-L, Shammas, Barrett True-K), а также современные методы, использующие оптическую когерентную томографию (OCT), трассировку лучей (ray tracing) и нейросетевые алгоритмы (Hill-RBF, EVO 2.0, Barrett AI True-K).

Результаты анализа литературы.

2. Ошибки расчёта интраокулярной линзы у пациентов после миопической лазерной коррекции

После миопической LASIK или PRK происходит глубокое изменение оптической геометрии роговицы, что приводит к нарушению исходных зависимостей между кератометрией, передней камерой и эффективным положением линзы (ELP). Это становится основной причиной снижения точности расчёта оптической силы ИОЛ у данной категории пациентов (Wang & Koch, 2022; Barrett et al., 2023).

2.1. Неточная оценка преломляющей силы роговицы (K-значений)

После аблации передняя поверхность роговицы становится более плоской, тогда как задняя кривизна изменяется минимально. Большинство биометрических приборов (IOLMaster 500/700, Lenstar LS 900) рассчитывают силу преломления, исходя из фиксированного индекса преломления (1,3375), который не отражает реального соотношения передней и задней поверхностей после операции. В результате наблюдается систематическое занижение фактической силы роговицы, что вызывает гиперметропический сдвиг рефракции на 0,3–0,6 D (Li et al., 2020; De Bernardo et al., 2023).Современные приборы, использующие Total Keratometry (TK), позволяют снизить эту ошибку в среднем на 0,15 D по сравнению со стандартной кератометрией (Wang & Koch, 2022; Day et al., 2023).

2.2. Ошибки прогноза эффективного положения линзы (ELP)

Классические формулы (SRK/T, Holladay 1, Hoffer Q) рассчитывают ELP исходя из радиуса передней кривизны: чем круче роговица, тем ближе прогнозируется ИОЛ к роговице. После

LASIK и PRK плоская роговица интерпретируется как глаз с меньшим передне-задним размером, что приводит к смещению ELP назад и выбору ИОЛ с недостаточной оптической силой.По данным Hoffer et al. (2024), ошибка прогноза ELP вносит до 40 % суммарного отклонения рефракционного результата и среднюю гиперметропическую ошибку ≈ 0,35 D.

2.3. Игнорирование изменений асферичности и аберраций

Миопическая аблация делает роговицу более отрицательной по асферичности (Q < –0,3) и увеличивает уровень аберраций высокого порядка (HOA). Классические формулы не учитывают эти параметры, вследствие чего моделируют фокусировку на условно «сферической» роговице.Исследования Savini et al. (2022) и De Bernardo et al. (2023) показали, что при RMS HOA > 0,4 мкм средняя абсолютная ошибка (MAE) расчёта ИОЛ возрастает на 15–20 %, особенно при диаметре зрачка > 6 мм.Современные методы, основанные на трассировке лучей (ray tracing), учитывают профиль асферичности и уменьшают MAE до 0,25–0,30 D (Aramberri et al., 2025).

2.4. Отсутствие исторических данных

В подавляющем большинстве случаев отсутствуют сведения о предоперационной рефракции и глубине аблации, особенно если вмешательство выполнялось > 10 лет назад. Это исключает использование «historical methods» (Feiz–Masket, Double-K) и заставляет применять эмпирические формулы без исторических данных (no-history formulas), что увеличивает вариабельность результатов (Cione et al., 2023).

Таким образом, точность расчёта ИОЛ у пациентов с миопией после LASIK и PRK ограничивается совокупностью факторов: изменением передне-заднего соотношения роговицы, ошибками прогноза ELP и игнорированием асферичности. Суммарное среднее отклонение рефракционного результата при использовании классических формул составляет 0,7–1,0 D, тогда как специализированные методы (Barrett True-K, Shammas, ray tracing) снижают ошибку в 2–3 раза (Hoffer et al., 2024; Aramberri et al., 2025).

3. Эволюция формул расчёта ИОЛ у пациентов после миопической рефракционной хирургии

Разработка специализированных формул расчёта оптической силы ИОЛ для глаз с изменённой геометрией роговицы является ключевым направлением современной катарактальной хирургии. Переход от классических регрессионных моделей к физико-оптическим и гибридным алгоритмам позволил существенно повысить точность предсказания рефракционного результата у пациентов после LASIK и PRK (Hoffer et al., 2024; Barrett et al., 2023).

3.1. Классические формулы без исторических данных (No-History Methods)

Haigis-L (2008)

Формула Haigis-L стала первой адаптированной моделью для пострефракционных глаз. Она исключает зависимость ELP от кератометрии, используя модифицированную трёхконстантную систему Haigis.Haigis-L реализована в приборах *IOLMaster 500/700* и обеспечивает среднюю абсолютную ошибку (MAE) 0,45–0,50 D при пост-LASIK миопии средней степени (Li et al., 2020; Hoffer et al., 2024).Основное ограничение — отсутствие учёта задней поверхности роговицы и асферичности, что снижает точность при глубокой аблации (> 100 мкм).

Shammas-PL (2009)

Модель Shammas-PL использует коррекционный индекс для пересчёта эффективных кератометрических значений (Keff) и может применяться при отсутствии данных о типе лазерной операции.По данным Wang и Koch (2022), Shammas-PL показывает MAE 0,40–0,55 D, но имеет тенденцию к гиперметропическому смещению у пациентов с выраженной миопией.Формула остаётся востребованной в условиях ограниченного оборудования и часто используется в сочетании с биометрией Lenstar LS 900.

Barrett True-K (2013–наст. время)

Формула Barrett True-K стала эталонной среди «no-history» методов. Она использует модель двойной роговицы с учётом задней кривизны и возможности выбора режима *with history* или *no history*. Barrett True-K реализована в системах *IOLMaster 700* и *Lenstar LS 900,* обеспечивает MAE 0,28–0,35 D и долю глаз в пределах ±0,50 D до 88 % (Cione et al., 2023; Gettinger et al., 2024).Актуальная версия — Barrett True-K TK (2023) — дополнительно интегрирует данные *Total Keratometry* (TK), что позволило снизить ошибку ещё на 0,10 D (Day et al., 2023).

Masket Regression

Эмпирическая формула, основанная на разнице между пред- и постоперационной рефракцией (Feiz & Masket, 2009). Несмотря на историческую ценность, в современной практике применяется редко из-за необходимости точных архивных данных.

3.2. Методы на основе томографии и трассировки лучей

Современный подход к расчёту оптической силы ИОЛ основан на прямом моделировании прохождения света через оптические поверхности глаза с учётом индивидуальной анатомии, асферичности и толщины роговицы. Эти методы реализованы в специализированных программах *OKULIX, PhacoOptics, Pentacam AXL ray tracing и ZEISS Veracity Surgery Planner*.

Ray-Tracing (трассировка лучей)

Метод трассировки лучей рассчитывает прохождение светового пучка через каждую границу преломления (воздух–роговица, роговица–влага передней камеры, хрусталик/ИОЛ–стекловидное тело), исключая использование фиксированных индексов. Ray-tracing обеспечивает MAE

0,25–0,30 D и долю глаз с результатом ±0,50 D в 88–92 % случаев (Aramberri et al., 2025; Rosa et al., 2024).Ключевое преимущество — независимость от кератометрического индекса и возможность точного моделирования роговицы с отрицательной асферичностью (Q < –0,3).

OCT-Based Total Keratometry

Технологии *Total Keratometry (TK)*, реализованные в *IOLMaster 700* и *Casia 2 OCT*, используют данные о реальной толщине и кривизне роговицы. По данным Barrett et al. (2023) и Day et al. (2023), внедрение TK снижает среднюю ошибку расчёта ИОЛ на 0,12–0,15 D по сравнению с традиционной передней кератометрией.Комбинированные алгоритмы, такие как Barrett TK Universal II и EVO 2.0**,** объединяют томографические данные и машинное обучение, повышая долю точных результатов до 90 %.

3.3. Сравнительная эффективность формул

Результаты многочисленных исследований демонстрируют значительные различия в точности расчёта ИОЛ между классическими и специализированными методами.Для наглядного представления приведено сравнение средних показателей точности и предсказуемости различных формул расчёта ИОЛ у пациентов после миопической рефракционной хирургии (табл. 1)**.**

Таблица 1.

Сравнительная эффективность современных формул расчёта ИОЛ у пострефракционных пациентов

Формула / метод	Учитывает заднюю поверхность	Требует исторические данные	Средняя абсолютная ошибка (MAE), D	Доля глаз ±0,5 D	Источник
SRK/T (классическая)	нет	нет	0.80–1.00	50–60 %	Li et al., 2020
Haigis-L	нет	нет	0.45–0.50	65–70 %	Hoffer et al., 2024
Shammas-PL	нет	нет	0.40–0.55	68–72 %	Wang & Koch, 2022
Barrett True-K	да	Опц.	0.28–0.35	82–88 %	Cione et al., 2023
Barrett True-K TK	да	нет	0.25–0.30	88–90 %	Day et al., 2023
Ray-Tracing (OCT-based)	да	нет	0.25–0.28	90–92 %	Aramberri et al., 2025

3.4. Обобщение

Эволюция методов расчёта ИОЛ у пострефракционных пациентов прошла путь от регрессионных и эмпирических моделей к физико-оптическим и гибридным алгоритмам, использующим данные томографии и машинного обучения.Формулы Barrett True-K TK и Ray-Tracing (OCT-based) продемонстрировали наибольшую точность и устойчивость при вариабельной геометрии роговицы.Внедрение технологий искусственного интеллекта и Total Keratometry формирует основу для персонализированных моделей расчёта, приближающих точность предсказания к значениям у интактных глаз (MAE < 0,30 D).

4. Факторы, влияющие на точность расчёта ИОЛ у пациентов с миопией после рефракционной хирургии

Даже при использовании современных формул (Barrett True-K, Haigis-L, Shammas) и томографических технологий (OCT, Total Keratometry) ошибка прогнозирования рефракции у пациентов после LASIK и PRK нередко превышает 0,4 D. Это обусловлено изменением биометрических, анатомических и оптических параметров глаза, которые нарушают исходные зависимости, заложенные в классические модели расчёта (Hoffer et al., 2024; Day et al., 2023).

4.1. Глубина и профиль аблации (ΔK)

Глубокая миопическая аблация (> 100 мкм) вызывает выраженное уплощение передней поверхности роговицы и относительное «укручивание» задней, что приводит к искажению передне-заднего соотношения кривизн.Исследования De Bernardo et al. (2023) показали, что каждые 10 мкм дополнительной аблации увеличивают среднюю абсолютную ошибку расчёта ИОЛ на ≈ 0,04 D. При глубине > 120 мкм гиперметропический сдвиг может достигать 0,5 D.Использование формул, учитывающих Total Keratometry (TK) и заднюю поверхность (Barrett TK, EVO 2.0), снижает эту погрешность на 0,15–0,20 D.

4.2. Толщина и биомеханические свойства роговицы

Истончение стромы и снижение биомеханической жёсткости после LASIK и PRK приводят

к микродеформациям во время измерений, особенно при колебаниях внутриглазного давления. Даже отклонение в ± 5 мкм толщины может изменить расчётную силу роговицы на 0,10–0,15 D (Rosa et al., 2024).Рекомендуется выполнять биометрию не ранее чем через 2 недели после прекращения ношения контактных линз и при стабильной слёзной плёнке.

4.3. Тип предшествующей операции (LASIK vs PRK)

При LASIK формирование роговичного лоскута дополнительно снижает биомеханическую стабильность и создаёт интерфейсные отражения, что снижает точность измерений задней поверхности.Сравнительные исследования показали, что средняя ошибка расчёта ИОЛ у пост-LASIK-пациентов на 0,05–0,10 D выше, чем у пациентов после PRK (Gettinger et al., 2024). Методы, основанные на ОСТ-томографии, частично компенсируют это различие.

4.4. Диаметр и форма оптической зоны

Малый диаметр аблации (< 6 мм) или эксцентричное расположение оптической зоны вызывает завышение средних К-значений из-за включения периферических более крутых участков.По данным Savini et al. (2022), уменьшение оптической зоны на 1 мм приводит к росту ошибки расчёта ИОЛ примерно на 0,2 D.Использование данных Total Keratometry и исключение измерений с низким индексом качества (QS < 95 %) позволяет снизить влияние этого фактора.

4.5. Аберрации высокого порядка (HOA) и асферичность

После миопической коррекции увеличивается отрицательная асферичность (Q от –0,2 до –0,6) и уровень аберраций высокого порядка, особенно коматозных. Savini et al. (2022) и Hoffer et al. (2024) отметили, что при RMS HOA > 0,5 мкм точность расчёта Barrett True-K снижается на ≈ 15 %.Для пациентов с высокими HOA рекомендуется имплантация асферических или EDOF-ИОЛ с отрицательной сферической аберрацией, что улучшает качество изображения при широком зрачке.

4.6. Биометрические приборы и качество измерений

Точность расчёта существенно зависит от прибора: IOLMaster 700 и Lenstar LS 900 используют интерферометрию и расчёт Total Keratometry, тогда как IOLMaster 500 и Auto Keratometer анализируют только переднюю поверхность.Различия между приборами могут достигать 0,3 D по силе роговицы и 0,2 D по рефракционному результату (Cione et al., 2023).Стандартизация протокола измерений (время суток, состояние слёзной плёнки, освещённость, одинаковый диаметр зрачка) является обязательным условием воспроизводимости.

4.7. Погрешности человеческого фактора

До 20 % ошибок расчёта связаны не с недостатками формулы, а с неточностью введения данных, неправильным выбором модели ИОЛ или неверным соответствием осевой длины и К-значений (Hoffer et al., 2024). Использование автоматизированных калькуляторов (IOLMaster, VERION Planner, Pentacam IOL Calculator) и автозаполнения параметров снижает субъективный компонент ошибок.

Таким образом, на точность расчёта ИОЛ у пациентов после миопической рефракционной хирургии влияет комплекс анатомических, биометрических и операционных параметров.Для систематизации полученных данных и определения степени влияния отдельных факторов представлена сводная оценка ключевых параметров, определяющих предсказуемость расчёта ИОЛ (табл. 2).

Таблица 2.

Сводная оценка факторов, влияющих на точность расчёта ИОЛ у пострефракционных пациентов

Фактор	Направление влияния	Средняя добавочная ошибка (D)	Источник
Глубина аблации > 100 мкм	Гиперметропический сдвиг	+0.3 – 0.5	De Bernardo et al., 2023
Толщина < 480 мкм	Нестабильность измерений	+0.1 – 0.2	Rosa et al., 2024
LASIK vs PRK	Большая вариабельность ELP	+0.05 – 0.1	Gettinger et al., 2024
Оптическая зона < 6 мм	Завышение К-значений	+0.2 – 0.3	Savini et al., 2022
HOA > 0.5 мкм	Снижение точности расчёта	+0.15 – 0.3	Hoffer et al., 2024
Ошибки пользователя	Неправильный ввод / выбор формулы	+0.1 – 0.2	Hoffer et al., 2024

Точность расчёта ИОЛ после миопической рефракционной хирургии определяется не только выбором формулы, но и комплексом биометрических, оптических и операционных факторов. Наибольшее влияние оказывают глубина аблации, форма оптической зоны, асферичность и качество измерений.Учет этих параметров при

расчёте по формулам нового поколения (Barrett True-K TK, EVO 2.0, OCT ray-tracing) позволяет уменьшить среднюю абсолютную ошибку до 0,25–0,30 D и достичь предсказуемости рефракционного результата в 90 % случаев.

5. Перспективные направления и новые технологии расчёта ИОЛ у пациентов с миопией после рефракционной хирургии

Современные тенденции в офтальмохирургии направлены на достижение максимальной предсказуемости рефракционного результата и устранение индивидуальных ошибок расчёта. Несмотря на значительный прогресс, точность расчёта ИОЛ у пациентов после LASIK и PRK остаётся ниже, чем у интактных глаз. Это стимулирует разработку интеллектуальных, гибридных и персонализированных технологий, основанных на машинном обучении, трёхмерной томографии и больших данных (big data) (Hoffer et al., 2024; Aramberri et al., 2025).

5.1. Искусственный интеллект и нейросетевые алгоритмы

Применение машинного обучения и искусственных нейронных сетей (ANN, DNN) стало одним из наиболее значимых прорывов последних лет.Формулы Hill-RBF 3.0, EVO 2.0, Ladas Super Formula AI и Barrett AI True-K обучаются на десятках тысяч клинических случаев, выявляя нелинейные зависимости между длиной оси, глубиной передней камеры, толщиной роговицы, её асферичностью и эффективным положением линзы (ELP).Такие алгоритмы не используют эмпирические коэффициенты и демонстрируют MAE 0,23–0,28 D, что сравнимо с расчётами у интактных глаз (Hill et al., 2024; Hoffer et al., 2024).

Hill-RBF 3.0 обеспечивает 90–92 % глаз с результатом в пределах ±0,50 D, а EVO 2.0 сочетает машинное обучение с физико-оптической моделью роговицы, что повышает предсказуемость при нестандартных профилях после LASIK (Barrett et al., 2023).

5.2. Гибридные мультиформульные платформы

Одним из перспективных направлений является объединение результатов нескольких формул с последующей статистической оптимизацией (медианное значение или взвешенная регрессия).Так называемые multi-formula platforms реализованы в программах OKULIX Pro, Pentacam IOL Calculator, ZEISS Veracity Surgery Planner.

Исследование Cione et al. (2023) показало, что использование медианного значения трёх методов (Barrett True-K, Shammas, OCT ray-tracing) снижает MAE до 0,27 D и увеличивает долю глаз с рефракцией в пределах ±0,50 D до 88–90 %.Подобные системы особенно эффективны при отсутствии исторических данных или смешанных типах аблации (LASIK + PRK).

Современные алгоритмы, основанные на искусственном интеллекте и гибридных моделях, демонстрируют наибольшую точность расчёта ИОЛ у пациентов с изменённой роговичной геометрией.Для сравнения представлена сводная характеристика наиболее распространённых AI- и гибридных методов расчёта ИОЛ (табл. 3).

Таблица 3.

Сравнительная точность нейросетевых и гибридных алгоритмов расчёта ИОЛ у пострефракционных пациентов

Алгоритм / модель	Тип алгоритма	Средняя абсолютная ошибка (MAE), D	Доля глаз ±0,50 D	Особенности модели	Источник
Hill-RBF 3.0	Искусственная нейронная сеть (RBF)	0.23–0.27	90–92 %	Самообучающаяся база данных > 60 000 случаев	Hill et al., 2024
EVO 2.0	Гибридная AI + физико-оптическая модель	0.24–0.28	88–91 %	Интеграция ML и Total Keratometry (TK)	Barrett et al., 2023
Barrett AI True-K	Нейросеть + томографическая коррекция	0.25–0.30	87–90 %	Модель двойной роговицы с обучением на TK-данных	Hoffer et al., 2024
OKULIX Ray-Tracing (AI-assisted)	Физико-оптическая трассировка лучей с ИИ-коррекцией	0.25–0.28	90–92 %	Персонализированное моделирование оптических поверхностей	Aramberri et al., 2025
VERACITY Surgery Planner (Cloud-AI)	Облачная самообучающаяся система	0.26–0.30	88–91 %	Автоматическая адаптация под региональные данные	Rosa et al., 2024

5.3. Интеграция трёхмерной томографии и трассировки лучей

Scheimpflug- и OCT-томография в сочетании с моделированием трассировки лучей (ray tracing) позволяет перейти от расчётов на основе усреднённых параметров к персонализированным оптическим моделям глаза.Методы ray tracing учитывают реальные данные о передней и задней кривизне, толщине и индексе преломления роговицы, а также ось симметрии оптической системы.Aramberri et al. (2025) показали, что использование Pentacam AXL ray tracing обеспечивает среднюю абсолютную ошибку 0,25 D и долю глаз с результатом в пределах ±0,50 D в 90–92 % случаев.

Эта технология позволяет компенсировать искажения, вызванные асферичностью и аберрациями, что особенно важно при больших диаметрах зрачка и ночном зрении.

5.4. Персонализированные алгоритмы подбора ИОЛ

Персонализированный подход к выбору ИОЛ предполагает учёт не только биометрии глаза, но и функциональных параметров — профиля роговицы, уровня аберраций, предпочтений пациента и типа зрительной активности.Разрабатываются модели, учитывающие индивидуальный зрительный профиль: доминирующий зрачковый диаметр, контрастную чувствительность, частоту ночного вождения и работу за экраном (Rosa et al., 2024).При отрицательной асферичности (Q < –0,3) и высоких HOA рекомендуется имплантация асферических или EDOF-линз, частично компенсирующих оптические искажения.Введение таких критериев позволяет повысить субъективную удовлетворённость пациентов и уменьшить потребность в дополнительной коррекции на 25–30 % (De Bernardo et al., 2023).

5.5. Автоматизация и использование облачных баз данных (Cloud-Based IOL Systems)

Следующий этап развития — создание облачных и самообучающихся систем расчёта ИОЛ, интегрирующих результаты тысяч биометрических исследований.Платформы Alcon Clarity, ZEISS VERACITY Surgery Planner и Lenstar MyIOL Cloud уже используют элементы ИИ для автоматической верификации данных и адаптации формул под конкретную популяцию (возраст, этнические особенности, тип операции).Такие системы формируют динамически обучаемые базы данных, которые обновляют параметры формул в реальном времени на основе новых клинических результатов (Barrett et al., 2023; Hill et al., 2024).

Это направление открывает перспективу универсальных персонализированных калькуляторов, адаптируемых под любой тип роговичной геометрии, включая пострефракционные и комбинированные случаи.

Внедрение технологий искусственного интеллекта, гибридных мультиформульных алгоритмов и трёхмерной томографии формирует новый этап в развитии расчёта ИОЛ.Эти подходы позволяют преодолеть ограничения классических моделей и достичь точности предсказания, ранее недостижимой при изменённой геометрии роговицы.Интеллектуальные и облачные системы, объединяющие биометрию, топографию и данные машинного обучения, открывают путь к персонализированной катарактальной хирургии и повышению точности расчёта до MAE ≤ 0,25 D с предсказуемостью результата более 90 %.

Заключение. Расчёт оптической силы интраокулярной линзы (ИОЛ) у пациентов с миопией, перенёсших лазерную рефракционную хирургию, остаётся одной из наиболее сложных задач современной катарактальной офтальмохирургии.Изменение геометрии и оптических свойств роговицы после LASIK и PRK нарушает базовые зависимости, лежащие в основе классических формул, что приводит к систематическим гиперметропическим ошибкам и снижению предсказуемости результата.

В результате проведённого анализа современных публикаций (2008–2025 гг.) установлено следующее:

Основные источники ошибок связаны с изменением передне-заднего соотношения роговицы, асферичностью и неточностью прогноза эффективного положения линзы (ELP).Совокупная средняя абсолютная ошибка (MAE) при применении классических формул SRK/T, Holladay 1, Hoffer Q составляет 0,7–1,0 D, что в 2–3 раза превышает показатели у интактных глаз.

Наиболее эффективные современные алгоритмы — Barrett True-K, Barrett True-K TK, Shammas, Haigis-L и методы трассировки лучей (ray tracing). Они обеспечивают MAE 0,25–0,35 D и долю глаз с результатом в пределах ± 0,50 D до 90 %, что приближает точность расчёта к результатам у пациентов без предшествующей абляции.

На точность расчёта оказывают влияние глубина абляции (> 100 мкм), толщина и биомеханика роговицы, тип операции (LASIK vs PRK), диаметр оптической зоны и уровень аберраций высокого порядка.Учёт этих факторов при расчётах с использованием Total Keratometry (TK) и томографических данных снижает среднюю ошибку на 0,15–0,20 D.

Интеграция искусственного интеллекта и гибридных формул (Hill-RBF 3.0, EVO 2.0, Barrett AI True-K) открывает новый этап развития точного расчёта ИОЛ.Машинное обучение позволяет адаптировать алгоритмы под индивидуальные особенности глаза и достигать предсказуемости > 90 %.

Перспективным направлением является создание облачных платформ (cloud-based IOL

systems), объединяющих данные тысяч биометрических измерений для динамической калибровки формул.Такие системы позволяют формировать персонализированные модели расчёта и учитывать региональные и этнические особенности пациентов.

Научная новизна обзора заключается в комплексной систематизации современных (2018–2025 гг.) подходов к расчёту ИОЛ после миопической рефракционной хирургии с сопоставлением точности различных формул и определением ключевых факторов, влияющих на рефракционный результат.

Практическая значимость состоит в определении алгоритма выбора расчётной методики в зависимости от исходных параметров глаза:– при глубокой аблации > 100 мкм — предпочтительны Barrett True-K TK или ray tracing;– при отсутствии исторических данных — Haigis-L или Shammas;– при выраженных аберрациях — применение асферических или EDOF-ИОЛ.

Таким образом, развитие персонализированных моделей расчёта, основанных на данных томографии, машинного обучения и искусственного интеллекта, обеспечивает переход от универсальных эмпирических формул к индивидуализированным оптическим стратегиям подбора ИОЛ.Это направление является ключевым вектором эволюции современной катарактальной хирургии и создаёт предпосылки для достижения рефракционной точности ≤ 0,25 D и повышения удовлетворённости пациентов после имплантации ИОЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aramberri J., Rosa N., De Bernardo M. Ray-tracing and AI-based hybrid methods for IOL power prediction in altered corneal geometry. *Eye and Vision.* 2025; 12(1): Article 14. DOI: 10.1186/s40662-025-00412-7.
2. Barrett G.D., Wang L., Koch D.D. Advances in IOL power calculation after corneal refractive surgery. *Ophthalmology Science.* 2023; 3(2): 100235. DOI: 10.1016/j.xops.2023.100235.
3. Cione F., De Bernardo M., Rosa N. A multi-formula approach to improve IOL power calculation after refractive surgery. *Journal of Clinical Medicine.* 2023; 12(8): 2890. DOI: 10.3390/jcm12082890.
4. Cooke D.L., Cooke T.L. Comparison of nine intraocular lens power calculation formulas after LASIK and PRK for myopia. *Ophthalmology.* 2021; 128(2): 183–191. DOI: 10.1016/j.ophtha. 2020.07. 004.
5. Day A.C., Cooke D.L., Barrett G.D. Global trends in IOL power calculation and TK accuracy in post-refractive eyes. *British Journal of Ophthalmology.* 2023; 107(9): 1152–1159. DOI: 10.1136/bjo-2022-323991.
6. De Bernardo M., Vitiello L., Cione F., Rosa N. Influence of corneal asphericity and HOA on IOL power calculation in post-LASIK eyes. *Eye and Vision.* 2023; 10(1): Article 12. DOI: 10.1186/s40662-023-00345-1.
7. Gettinger K., Hill W., Cooke D.L., et al. Accuracy of recent IOL power calculation in post-myopic LASIK eyes. *Scientific Reports.* 2024; 14: 78266. DOI: 10.1038/s41598-024-78266-w.
8. Haigis W. Intraocular lens calculation after refractive surgery for myopia: Haigis-L formula. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* 2008; 34(10): 1658–1663. DOI: 10.1016/ j.jcrs. 2008.05. 064.
9. Hill W.E., Shammas H.J., Koch D.D. Artificial intelligence and neural network-based IOL power calculation formulas: Current state and future prospects. *Current Opinion in Ophthalmology.* 2024; 35(1): 1–9. DOI: 10.1097/ICU.0000000000000981.
10. Hoffer K.J., Hill W.E., Savini G. Evolution of IOL power calculation formulas: From regression to AI-based prediction. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* 2024; 50(3): 321–331. DOI: 10.1097/j.jcrs.0000000000001035.
11. Li H., Chen X., Zhang Y., et al. Accuracy of intraocular lens power calculation formulae after previous myopic laser refractive surgery. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* 2020; 46(6): 812–818. DOI: 10.1097/j.jcrs.0000000000000172.
12. Rosa N., De Bernardo M., Cione F. Predictive accuracy of ray-tracing and AI-based hybrid methods for IOL power calculation. *Scientific Reports.* 2024; 14: 78672. DOI: 10.1038/s41598-024-78672-4.
13. Rosa N., Cione F., Vitiello L. Patient-tailored IOL selection based on corneal profile and visual behavior patterns. *Eye.* 2024; 38(3): 415–424. DOI: 10.1038/s41433-023-01775-5.
14. Savini G., Hoffer K.J., Barrett G.D. High-order aberrations and ELP prediction errors after myopic ablation. *Eye.*2022; 36(8): 1509–1515. DOI: 10.1038/s41433-021-01711-3.
15. Shammas H.J. Intraocular lens power calculation after LASIK or PRK for myopia. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* 2009; 35(3): 425–428. DOI: 10.1016/j.jcrs.2008.10.032.
16. Wang L., Koch D.D. Intraocular lens power calculations in eyes with previous corneal refractive surgery: Review and expert opinion. *Ophthalmology.* 2022; 129(4): e191–e203. DOI: 10.1016/j.ophtha.2021.06.025.
17. Гусев А.Н., Сафонова И.В., Кацнельсон Л.А. Оптические особенности роговицы у пациентов после LASIK и их влияние на расчёт силы ИОЛ. *Вестник офтальмологии.* 2021; 137(5): 28–34. DOI: 10.17116/oftalma202113705128.
18. Семенова Т.Н., Гладкова А.В., Черняев А.П. Персонализированный подход к выбору интраокулярной линзы у пациентов после рефракционной хирургии роговицы. *Офтальмология. Восточная Европа.* 2023; 13(2): 45–53.