
Содержание

Предисловие к изданию на русском языке	6
Авторы	7
Список сокращений и условных обозначений	8
Часть I. Основные принципы	9
1. Исследование формы роговицы.....	11
2. Видеокератоскопы	28
3. Проекционные системы	44
4. Системы на основе шаймпфлюг-камеры	57
5. Отображение результатов кератотопографии.....	67
Часть II. Роговица в норме	109
6. Топография роговицы в норме	111
7. Кератотопография и контактная коррекция.....	133
Часть III. Патология роговицы.....	159
8. Болезни поверхности роговицы	161
9. Болезни стромы роговицы	176
10. Кератэктазии.....	187
Часть IV. Хирургия роговицы	215
11. Кератопластика.....	217
12. Катарактальная хирургия	238
13. Рефракционные вмешательства на роговице	254
14. Рефракционная лазерная хирургия.....	295
15. Хирургические вмешательства на глазном яблоке	336
Предметный указатель.....	348

Предисловие к изданию на русском языке

Книга «Кератотопография. Теория и практика» авторитетных западных авторов, переведенная на русский язык, отражает все основные современные достижения в области компьютерной топографии роговицы. Массовое применение корнеальных топографов последних поколений в современной практике требует от практикующих офтальмологов освоения технических основ и изучения принципов работы этих приборов. В представленном руководстве очень доступно изложены подходы к интерпретации различных вариантов отображения результатов математической реконструкции топограмм, приведена информация о возможностях и пределах в использовании топографов в клинической практике. Издание построено в основном на личном опыте авторов, особенно ценно для практикующих врачей и включает все области применения топографии роговицы — это диагностика заболеваний роговицы, оптические расчеты при реконструктивных операциях, особенности топографии роговицы после различных хирургических вмешательств на роговице. Показано сбалансированное сочетание использования интуитивной и клинической оценки топограмм в сочетании со статистическими методами и элементами искусственного интеллекта. В кратких разделах систематизированы результаты топографии роговицы после некоторых кераторефракционных операций или других травмирующих роговицу воздействий, что делает работу уникальной.

В книге все представленные клинические варианты детально проиллюстрированы, что значительно облегчает восприятие информации и позволяет оценить полностью очень широкий спектр возможностей корнеальной топографии и ее место в диагностике глазных заболеваний.

Исследование формы роговицы

Глава 1

Передняя поверхность роговицы — основная преломляющая поверхность глаза, она обеспечивает более двух третей его оптической силы. Поэтому даже очень небольшие изменения формы роговицы могут резко нарушать фокусировку изображения на сетчатке. Желание пациентов и хирургов повысить зрительные функции в исходах заболеваний и хирургических вмешательств на роговице определило огромное значение методов точного измерения параметров поверхности роговицы.

Топография — наука детального описания и графического отображения различных параметров некой поверхности. За последние четыре столетия в ответ на постоянно возрастающие требования клинической практики разрабатывались все новые методы оценки топографии роговицы.

История кератотопографии

В начале XVII в. с появлением и широким распространением оптической коррекции аметропий возник интерес к изучению формы роговицы и оптических свойств глаза. Ранние исследования топографии роговицы ограничивались грубой оценкой ее кривизны (**рис. 1.1**).

В 1619 г. Христофор Шейнер (Scheiner) провел первые измерения поверхности роговицы [1]. Он взял несколько выпуклых зеркал (по другим сведениям, полированных мраморных шариков. — *Примеч. ред.*) разной кривизны и приставлял их к главному яблоку, пока не нашел то, отражение предметов в котором было такого же размера, как и в роговице.

В 1820-х гг. Фердинанд Луи Жозеф Куинье (Cuignet) разработал кератоскоп, при помощи которого он изучал отражения освещенных объектов на передней поверхности роговицы пациента. Главной трудностью, с которой столкнулся Куинье, было выровнять по зрительной оси глаза пациента источник света, тестовый объект и глаз наблюдателя. В 1882 г. эту проблему удалось разрешить Антонио Пласидо да Коста (Plácido), он проводил наблюдения через отверстие в центре тестового объекта [2], в качестве какового использовал диск с чередующимися



Рис. 1.1. Развитие кератотопографии. Изменение требований клиники стимулировало разработку новых методов и инструментов измерения

черными и белыми концентрическими кольцами; этот принцип до сих пор используется во многих кератотопографах.

Количественная оценка кривизны роговицы стала возможной после изобретения в 1854 г. Германом Людвигом Гельмгольцем (Helmholtz) кератометра (офтальмометра) [3]. Прибор позволял оценить сфероцилиндрическую кривизну центральной 3-миллиметровой зоны роговицы в двух меридианах по расстоянию между двумя парами отраженных точек. Чтобы расширить исследуемую область поверхности роговицы, Луи Эмиль Жаваль (Javal) в 1889 г. снабдил кератометр диском типа Пласидо. Телескопический окуляр позволил ему дополнительно увеличить видимое через кератоскоп изображение. Жаваль осознавал необходимость «фиксировать» изображение для измерения колец, однако на практике это удалось лишь Альвару Гульстранду (Gullstrand): в 1896 г. он присоединил к кератоскопу фотоаппарат, метод получил название фотокератоскопии. Предпринимались попытки количественной оценки выявляемых изменений путем сравнения кератотопограмм и фотографий сфер известного радиуса, однако подобные методики оказались очень трудоемкими.

Но до середины XX в. прогресс в области изучения топографии роговицы был незначительным. Интерес к кератотопографии резко возрос с введением в широкую практику контактных линз. Для подбора контактной линзы необходимо знать кривизну средней периферии роговицы. Кератометр позволяет получить эти данные только для сравни-

тельно нормальных роговиц при наличии только правильного астигматизма; прибор до сих пор используется при подборе контактных линз в несложных случаях.

С развитием методов микрохирургии и экстракции катаракты, кератопластики и рефракционной кератотомии внимание исследователей обратилось к оптической силе роговицы. Зная кривизну роговицы и применив стандартный кератометрический индекс (SKI; англ. standard keratometric index), можно рассчитать ее оптическую силу.

С улучшением результатов этих операций в аспекте достижения высоких зрительных функций все большее значение приобретала точность рефракционного вмешательства. Возникла необходимость исследовать топографию всей поверхности роговицы с высокой точностью и детализацией. Метод фотокератоскопии позволял получить качественную информацию о широкой зоне роговицы, однако количественный анализ изображений стал возможен только с развитием компьютерной техники и появлением видеокератоскопии. Для измерения абсолютного подъема поверхности роговицы было разработано несколько устройств, работающих на основе методов проекции, а не методов анализа отражения, однако в широкой клинической практике применяются в основном приборы, работающие на основе принципа Шаймпфлюга.

Взрывное развитие рефракционной хирургии также открыло новые перспективы развития систем для кератотопографии, в частности систем на основе шаймпфлюг-камеры, позволяющих детально исследовать переднюю и заднюю поверхности роговицы, а также регистрировать другие характеристики передней камеры глаза (см. главу 4) [4, 5].

Знание истории возникновения и развития кератотопографии помогает лучше понять устройство современных систем [6–8] и позволяет представить пути развития методов исследования роговицы в будущем.

Описание формы роговицы

Существует несколько способов исследования формы роговицы, измерения ее характеристик и отображения результатов [9–12]. Каждый из этих способов имеет свои достоинства, и выбор в конкретной клинической ситуации наиболее подходящего метода повышает информативность и диагностическую ценность исследования. Примеры использования той или иной методики исследования у разных больных приведены ниже.

Высота, или элевация, поверхности роговицы

Основной способ математически описать какую-либо поверхность — определить расстояние каждой ее точки от некой референтной (опорной) плоскости. На географической карте основной характеристикой суши является высота над уровнем моря. При исследовании роговицы стандартного положения референтной плоскости не существует, поэтому ее произвольно ориентируют по вершукке роговицы или по уровню лимба. Действительное положение используемой референтной плоскости не имеет никакого значения, так как оно не влияет на относительное положение точек на поверхности роговицы.

Результаты измерения высоты, или элевации (или, иногда, глубины), относительно референтной плоскости отражают реальную форму поверхности роговицы. Это особенно ценно при заболеваниях роговицы и при эксимер-лазерных вмешательствах, когда исход операции зависит от глубины удаленных и замещенных слоев стромы. После оценки реальной формы роговицы можно рассчитать наклон ее поверхности и оптическую силу (**рис. 1.2, в**).

Наклон поверхности роговицы

Наклон криволинейной поверхности в отдельной точке определяется углом наклона касательной к поверхности в этой точке (**см. рис. 1.2, г**). Математически наклон — это первый дифференциал кривой. Следовательно, наклон поверхности — более чувствительный параметр, отражающий небольшие изменения высоты между двумя точками поверхности.

Радиус кривизны

Другой способ описания наклона поверхности роговицы — определение радиуса кривизны (**см. рис. 1.2, д**). С помощью этой формулы можно перевести угол наклона (α) в радиус кривизны (r):

$$r = d / \cos \alpha,$$

где d — расстояние от центра роговицы ($\cos 0^\circ = 1$; $\cos 60^\circ = 0,5$; $\cos 90^\circ = 0$) (**рис. 1.3**). Крутые роговицы имеют малый радиус кривизны, а роговицы с плоской поверхностью, наоборот, больший радиус кривизны. В некоторых случаях, в частности при подборе контактных линз, этот показатель бывает очень удобен.

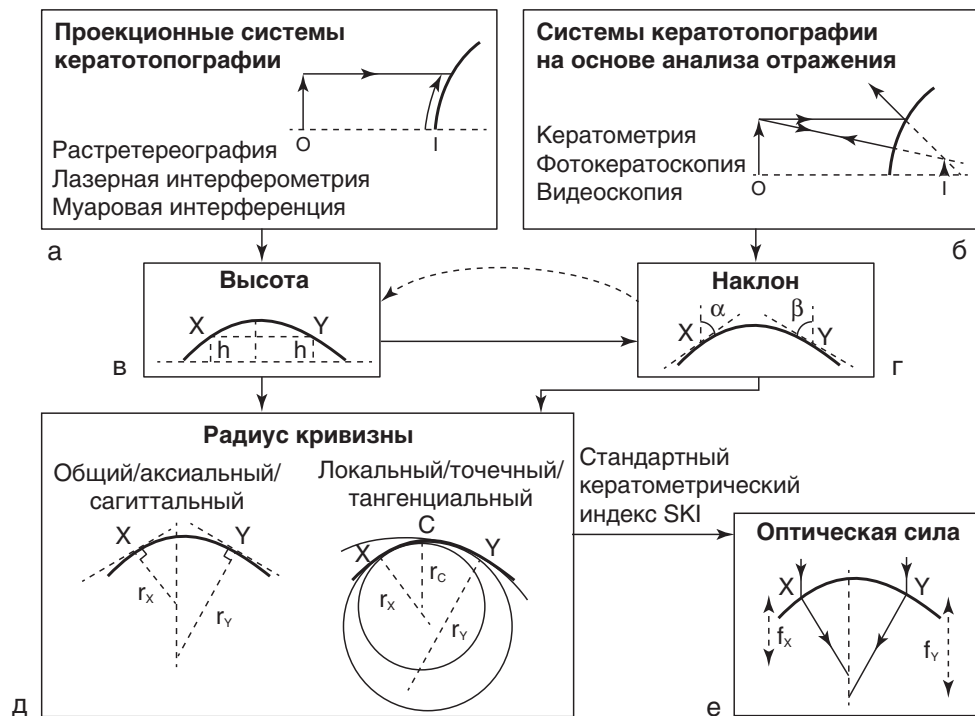


Рис. 1.2. Измерения и отображение результатов разными системами кератотопографии. Отмеченные на схемах точки X и Y имеют одинаковую высоту и лежат на противоположных полумеридианах асимметричной роговицы (как это бывает, например, при кератоконусе). Проекционные системы (а) проецируют на поверхность роговицы тестовый объект (о), регистрируют отраженное изображение (I) и вычисляют высоту (h) над референтной плоскостью (в); по результатам этих измерений оценивается истинная форма роговицы. На основании полученных данных можно рассчитать оптическую силу, наклон и кривизну поверхности. Системы, работающие на основе анализа отражения (б), регистрируют первый рефлекс Пуркинье, сформированный за роговицей, рассчитывают наклон (углы α и β) ее поверхности (г), кривизну и оптическую силу. Однако без дополнительных измерений и некоторых допущений невозможно перевести угол наклона в высоту. При необходимости рассчитывается радиус кривизны (д), как общий, так и локальный. Общий, или аксиальный, радиус кривизны — это длина перпендикуляра (r) касательной до пересечения со зрительной осью. Точность этого показателя падает на периферии роговицы. Локальный, или тангенциальный, радиус кривизны рассчитывается для сферы, наиболее точно соответствующей форме маленького участка поверхности роговицы вокруг каждой отдельной точки. В этом случае высокая точность сохраняется как в центре (точка C), так и на периферии (точки X и Y) роговицы. Зная радиус кривизны и применив стандартный кератометрический индекс, можно рассчитать оптическую силу, однако такие расчеты также требуют нескольких допущений. Оптическая сила (е) представляет собой меру способности роговицы преломлять свет; роговица выполняет функцию выпуклой линзы с фокусным расстоянием f, ее оптическая сила обратно пропорциональна фокусному расстоянию

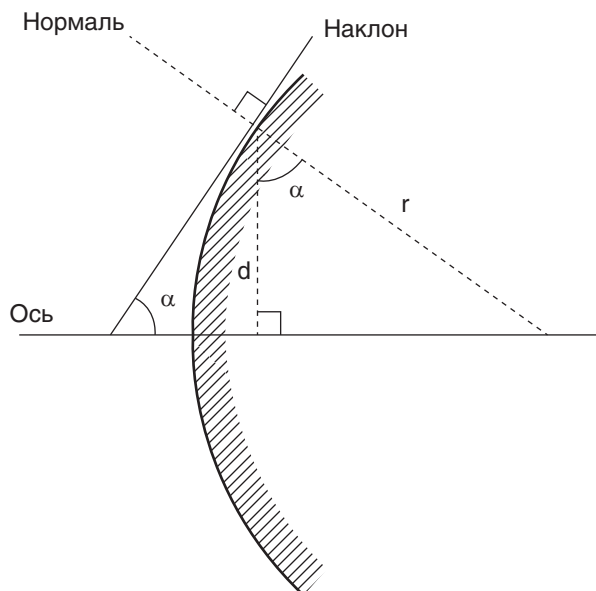


Рис. 1.3. Наклон поверхности и общий/аксиальный/сагиттальный радиус кривизны роговицы. Некая точка на поверхности роговицы лежит на расстоянии d от зрительной оси. Наклон поверхности роговицы в этой точке — угол α . Нормаль — перпендикуляр к поверхности роговицы (по касательной). Общий/аксиальный/сагиттальный радиус кривизны роговицы (r) — длина нормали от поверхности роговицы до пересечения со зрительной осью, он равен $d/\cos \alpha$ (см. рис. 1.2, е)

Можно рассчитать общий (аксиальный, сагиттальный) радиус кривизны, и именно этим параметром пользовались первоначально, однако позже для решения определенных задач стали рассчитывать локальный (точечный, тангенциальный) радиус кривизны [13, 14]. Каждый из этих двух показателей можно перевести в соответствующий показатель оптической силы (то есть общую или локальную рефракцию), который также в зависимости от ситуации обладает своими преимуществами и недостатками [15, 16].

Общий (аксиальный/сагиттальный) радиус кривизны. Общий радиус кривизны описывает кривизну роговицы в точках, лежащих вдоль каждого из ее идущих в радиальном направлении меридианов. Он измеряется как длина перпендикуляра к касательной, идущего от последней до пересечения со зрительной осью. Поскольку при использовании таких алгоритмов радиус кривизны измеряется от зрительной оси, на полученный результат влияет «сферическое искажение». Поэтому при формировании топограммы роговицы, основанном на этом принципе,

получаем результат, не очень чувствительный к локальным изменениям кривизны роговицы и с искажениями на периферии.

Локальный (точечный/тангенциальный) (в отечественной литературе также используют термин «моментальный». — Примеч. ред.) радиус кривизны. Локальный радиус кривизны в каждой отдельной точке рассчитывается как радиус некой условной сферы, кривизна которой наиболее близка кривизне роговицы в непосредственной близости от этой точки. Этот показатель гораздо менее подвержен «сферическим искажениям», так как описывает кривизну отдельного небольшого участка поверхности роговицы, не привязан к оптической оси и не зависит от формы остальной поверхности роговицы. Поэтому локальный радиус роговицы более точно отражает форму периферии роговицы и локальные изменения ее формы [13].

Оптическая сила роговицы

Оптическая сила представляет собой меру преломляющей способности линзы. Радиус кривизны линзы (r , в метрах) можно перевести в оптическую силу (P , в диоптриях) (**см. рис. 1.2, е**) с помощью формулы:

$$P=(n_2-n_1)/r,$$

где n_1 — показатель преломления первой среды (в случае передней поверхности роговицы — это воздух, $n=1$), n_2 — показатель преломления второй среды (в нашем случае — роговицы, $n=1,376$). Ту же формулу применяют к задней поверхности роговицы. Однако измерить кривизну задней поверхности роговицы значительно труднее [17, 18], поэтому при пересчете радиуса кривизны в оптическую силу пользуются $SKI=1,3375$, усредненным коэффициентом, рассчитанным с учетом кривизны обеих поверхностей роговицы [19, 20]. Однако в случае слишком толстой или, наоборот, слишком тонкой роговицы при оценке кривизны ее задней поверхности возникают значительные погрешности [21]. Дополнительные погрешности появляются вследствие того, что до сих пор точно не измерены показатели преломления роговицы и составляющих ее слоев [22]. Поэтому в кератотопографии применяется усредненный SKI , и формула, таким образом, принимает вид:

$$P=0,3375/r.$$

Однако необходимо помнить, что радиус кривизны в этой формуле измеряется в метрах, и, чтобы перевести его в привычные нам миллиме-

тры, необходимо разделить этот показатель на 1000, после чего формула превращается в:

$$P \text{ (в дптр)}=337,5/R \text{ (в миллиметрах)}.$$

Оптическая сила — очень наглядный показатель, позволяющий доступно объяснить роль роговицы в преломляющей системе глаза пациентам перед рефракционным вмешательством. Однако из-за усреднения используемых при этих расчетах параметров это наименее точный способ описания формы роговицы (**табл. 1.1**) [21–25]. Поэтому, когда требуется высокая точность, например при расчете оптической силы интраокулярной линзы (ИОЛ), необходимо учитывать радиус кривизны роговицы.

Таблица 1.1. Ошибки, возникающие при пересчете радиуса кривизны в оптическую силу

Допущения при пересчете радиуса кривизны в оптическую силу	Последствия
Формула пересчета разработана для сферической оптики	Неточность показателей за пределами центральной зоны роговицы
SKI рассчитан для роговиц с нормальной кривизной задней поверхности	Неточные результаты расчетов для очень плоских или очень крутых роговиц (то есть при высокой близорукости или высокой дальнозоркости)
SKI рассчитан для роговиц нормальной толщины	Неточность результатов расчетов у пациентов, перенесших эксимер-лазерную фоторефракционную кератэктомию (ФРК) или эпикератофакию
SKI рассчитан так, будто роговица обладает одинаковым показателем преломления на всем своем протяжении и на всю свою толщину, различия преломляющих свойств эпителия и стромы не учитывались	В некоторых ситуациях, например после рефракционных вмешательств, это приводит к появлению ошибок

Методы измерения

Существует два основных принципа исследования топографии роговицы: принцип отражения и принцип проекции (глава 3). Системы, использующие разные принципы, измеряют разные параметры.

Методы оценки отражения

Многие используемые в клинике современные системы кератотопографии используют принцип отражения (глава 2). В эту группу устройств входят кольца Пласидо, кератометр и видеокератоскопы (см. главу 2). Такие приборы измеряют наклон поверхности роговицы и на основании полученных данных рассчитывают радиус кривизны и оптическую силу (см. рис. 1.2, б). Однако измерив только лишь угол наклона поверхности, невозможно определить ее подъем (элевацию). Наклон отражает перепад высоты между двумя точками (х, у) исследуемой зоны, однако он никак не зависит от высоты, то есть от положения этих точек по оси z. Поэтому без многочисленных допущений, на основании только результатов исследования отражения невозможно реконструировать истинную форму роговицы [26–28].

Проекционные методы

В настоящее время в клинической практике используются многочисленные системы, использующие принцип проекции. В числе таких систем приборы, работающие на основе принципа Шаймпфлюга, щелевой фотографии, растерстереографии, муаровой интерференции и лазерной интерферометрии (главы 3 и 4) (в последнее время нашли применение еще и системы на основе оптической когерентной томографии. — *Примеч. ред.*). Они оценивают непосредственно форму роговицы, определяют подъем (элевацию) ее поверхности и на основании полученных результатов рассчитывают угол наклона, кривизну и оптическую силу (см. рис. 1.2, а) [29, 30].

Практическое применение кератотопографии

Кератотопография нашла свое применение как в клинической работе, так и в научных исследованиях. Метод неинвазивный, методика проведения исследования проста, и поэтому кератотопографию можно выполнить почти любому пациенту. Однако при использовании кератотопографии в клинической практике следует критически оценивать информативность исследования в конкретном клиническом случае, его стоимость, наличие и доступность альтернативных методов

диагностики [31, 32]. Принимая решение о проведении исследования, врач должен хорошо представлять себе, как полученные результаты повлияют на проводимое лечение и его исход.

В **табл. 1.2** приведены клинические ситуации, когда кератотопография будет очень ценным методом диагностики, а также ситуации, когда будет достаточно других исследований [33]. В таблице, помимо этого, описаны примеры использования кератотопографии в исследовательских целях. Каждый из этих случаев описан и проиллюстрирован в *следующих главах* настоящего руководства.

Таблица 1.2. Показания к кератотопографии в клинической работе и в исследовательских целях

Ситуация	Достаточно других методов диагностики, например кератометрии, рефрактометрии, исследования на щелевой лампе	Клинические показания к кератотопографии	Примеры использования кератотопографии в исследовательских целях
Нормальная роговица	—	Скрининг	Исследование формы
			Корреляция со зрительными функциями
Контактные линзы	Подбор в простых случаях	Подбор в сложных случаях	Действие линз на роговицу
		Выявление деформации поверхности роговицы при ношении контактных линз (warpage)	
Патология роговицы	Диагностика в повседневной практике	Наблюдение за течением болезни	Оптические эффекты
		Влияние на зрительные функции	
	Наблюдение в повседневной практике	Диагностика субклинических форм	
		Генетический скрининг	

Окончание табл. 1.2

Ситуация	Достаточно других методов диагностики, например кератометрии, рефрактометрии, исследования на щелевой лампе	Клинические показания к кератотопографии	Примеры использования кератотопографии в исследовательских целях
Хирургическое лечение катаракты	Простые случаи	Сложные случаи	Количественная оценка при клинических исследованиях
	Планирование разреза	Планирование разреза	Архитектоника разреза
	Расчет ИОЛ	Расчет ИОЛ	Исследование влияющих на результат факторов
	Снятие швов	Снятие швов Поиск причин неудовлетворительных результатов	
Кератопластика	Наблюдение в повседневной практике	Исследование формы и поверхности роговицы	Количественная оценка при клинических исследованиях
		Снятие швов	Исследование влияющих на результат факторов
		Подбор контактных линз	
Рефракционная хирургия	Наблюдение в повседневной практике	Скрининговые исследования перед операцией	Количественная оценка при клинических исследованиях
		Планирование разрезов	Изучение побочных эффектов
		Подтверждение перенесенных оперативных вмешательств	Исследование оптических свойств глаза после операции
		Поиск причин неудовлетворительных результатов	Наблюдение за процессами заживления
		Обсуждение с пациентом	

Роговица в норме и при патологии

Кератотопография применяется для количественной оценки формы нормальной роговицы, она помогает нам лучше понять взаимоотношения между анатомией и зрительными функциями (глава 6). Метод достаточно чувствителен при диагностике деформаций роговицы, например на ранних стадиях кератоконуса [34]. Исследование проводится при наблюдении и лечении пациентов, для выявления больных членов семьи в рамках генетических исследований и в целях скрининга перед рефракционными операциями. Динамику патологических изменений оценивают, сравнивая серии кератотопограмм; метод позволяет лучше понять влияние патологических процессов на зрительные функции (главы 8, 9 и 10).

Подбор контактных линз

При подборе контактных линз большинству пациентов достаточно выполнить кератометрию, однако в сложных случаях может потребоваться исследовать форму роговицы на всем ее протяжении. Детальный анализ топографии роговицы пользующихся контактными линзами пациентов показал, что характер деформации ее поверхности (warpage) коррелирует с положением жесткой контактной линзы на поверхности глаза, а также что эти изменения разрешаются после отмены линз значительно дольше, чем считалось ранее (глава 7).

Рефракционная хирургия и другие оперативные вмешательства на роговице

Кератотопография играет важную роль в интенсивно развивающихся областях хирургии роговицы, оперативного лечения глаукомы и катаракты (главы 12–14). Исследование топографии роговицы перед проникающей операцией помогает лучше спланировать разрез, а перед вмешательством по поводу катаракты — рассчитать силу ИОЛ. После рефракционной операции детальная количественная информация об исходе операции может быть использована для клинических исследований, например для оценки новых оптических свойств роговицы, центрации зоны вмешательства и наблюдения за динамикой достигнутых результатов в отдаленный период. При помощи кератотопографии можно выявить причины неожиданных послеоперационных эффектов, таких как формирование мультифокальной центральной зоны

роговицы после радиальной кератотомии или децентрация зоны воздействия после операций лазерного кератомилеза *in situ* (LASIK; англ. laser-assisted *in situ* keratomileusis) и ФРК. Эти данные помогают понять механизмы развития побочных эффектов и соответствующим образом скорректировать методику операции или определить оптимальные сроки и порядок снятия швов. При обсуждении с пациентом планируемого оперативного вмешательства или исхода операции очень помогают кератотопограммы с цветовой кодировкой.

Назначение различных систем кератотопографии

При разработке какого-либо измерительного оборудования всегда стремятся, чтобы оно выдавало как можно больше максимально точной и сложной информации. Такие системы предназначены прежде всего для исследовательской работы. Однако при разработке оборудования для использования в клинике стремление достичь совершенства ведет к неприемлемому увеличению размеров приборов, их дороговизне и неоправданным затратам времени на исследование.

При планировании закупок систем для кератотопографии в первую очередь необходимо определить, для каких целей они будут использоваться. Также следует оценить преимущества и стоимость новых систем в сравнении с уже используемой аппаратурой (например, щелевой лампой, рефрактометром и кератометром) [6, 7]. Аналогичным образом разработчики систем для кератотопографии должны учитывать требования клиники и мнение врачей относительно оптимального использования разрабатываемого оборудования.

Требования к аппаратуре для кератотопографии разнятся в зависимости от целей исследования, и в связи с этим неизбежно возникает вопрос: следует ли производить разные типы диагностических систем, или должны ли все кератотопографы одинаково хорошо справляться со всеми возникающими задачами? У разных специалистов также могут возникать разные требования, зависящие от их узкой специализации и целей лечения. Техники-оптики, оптометристы, специалисты по заболеваниям роговицы и рефракционные хирурги решают разные задачи. Поэтому каждый специалист должен решить для себя сам, чего он ожидает от кератотопографии.

В табл. 1.3 перечислены некоторые факторы, определяющие выбор той или иной системы для кератотопографии, как то: условия выпол-

нения исследования, особенности роговицы, измеряемые параметры и характер выдаваемой прибором информации. В таблице также указаны различные опции систем для кератотопографии, делающие их более подходящими для решения тех или иных задач.

Таблица 1.3. Назначение разных систем для кератотопографии

Фактор	Параметры	Опции
Клиническая ситуация	Взаимодействие с пациентом	Нужен объект для фиксации или нет?
	Передвижной кабинет	Монтаж системы на щелевой лампе
	Интраоперационная диагностика	Монтаж системы на операционном микроскопе
	Быстрота исследования	Портативная система
		Исследование в реальном времени
Роговица	Исследуемая зона	Система на основе оценки отражения или проекционная система
	Степень деформации	Исследование только роговицы или роговицы и лимба
	Отражающая способность	
	Диапазон значений кривизны	
Измерения	Показатели	Высота, наклон, кривизна или оптическая сила
	Преимущественная локализация точек измерений	Центрально-взвешенное или равномерное распределение
	Число точек измерений	Быстрая или длительная обработка данных
	Точность и воспроизводимость	Применение в клинике или для исследовательских целей

Окончание табл. 1.3

Фактор	Параметры	Опции
Отображение и применение результатов	Демонстрация пациенту, клиницисту или аудитории	2D или 3D цветные кератотопограммы
	Единичные или большой поток пациентов	Статистические индексы
	Предоперационное обследование	Хирургические номограммы
	Интеграция с хирургическим оборудованием или лазерами	Нейросети
		Специальное программное обеспечение

Наиболее подходящий тип кератотопографа определяется условиями проведения исследования, особенностями роговиц пациентов, с которыми планируется работать, теми показателями, которые необходимы конкретному врачу, а также тем, в каком виде и кому будут демонстрироваться результаты.

Условия проведения исследования

Большинство современных систем кератотопографии, выпускаемых промышленностью, представляют собой аппараты относительно больших размеров; для проведения исследования пациент должен поставить голову на упор и фиксировать взгляд на предъявляемом объекте. Появляющиеся сейчас на рынке портативные системы могут использоваться для проведения исследования у обездвиженных, престарелых или, наоборот, очень маленьких пациентов, а также в передвижных кабинетах [29]. Видеокератоскопы требуют очень точной фиксации взгляда пациентом, проекционные системы менее требовательны к точной фиксации взгляда. Ручные кератоскопы можно использовать во время хирургических вмешательств, однако большинство из этих приборов не компьютеризировано [36]. В идеальном варианте интраоперационная кератотопография требует анализа данных в реальном времени, так, чтобы изменения формы роговицы после каждого отдельного воздействия сразу же отображались аппаратом [37], однако это требует очень быстрой, почти мгновенной обработки данных.

Роговица

Некоторые системы выполняют очень точные измерения относительно нормальных роговиц, тогда как другие больше подходят для исследования деформированных роговиц. Устройства с относительно небольшим числом точек измерений (например, кератометры) или аппараты, выполняющие усреднение на основе нормальных показателей (например, шаймпфлюг-камеры), больше всего подходят для исследования относительно нормальных роговиц [38, 39]. Однако проекционные системы, непосредственно выполняющие большее число измерений во множестве точек роговицы, дают точные результаты при исследовании как деформированных роговиц, так и роговиц правильной формы. Системы, демонстрирующие на экране первичное изображение (например, видеокератоскопы), позволяют оператору оценить качество полученных данных. Для исследования периферии роговицы также лучше подходят проекционные системы, выполняющие расчеты без привязки к оптической оси [39].

Измерения

Разные задачи требуют измерения разных параметров. Определение подъема (элевации) поверхности роговицы возможно только при помощи проекционных методов кератотопографии, тогда как кривизну и оптическую силу измеряют все системы.

Точность и воспроизводимость результатов измерений во многом зависят от количества точек измерения и совершенства прибора [40]. Однако необходимая в клинической работе точность измерений обычно ненамного выше точности клинических методов диагностики. При уменьшении числа точек измерений увеличивается скорость обработки данных. Для получения наиболее полной информации об изменениях оптических свойств роговицы большинство точек измерений должны лежать в проекции зрачка.

Отображение и применение полученных результатов

Цветные кератотопограммы — прекрасный способ отображения результатов обследования отдельных пациентов. Можно суммировать показатели отдельных кератотопограмм, применить к ним математи-

ческие коэффициенты, сгруппировать данные и подвергнуть их статистическому анализу. Используются самые разные математические коэффициенты, необходимо лишь определить, который из них подходит лучше всего.

Появляются системы для кератотопографии с искусственной нейросетью, способной распознавать топографические паттерны и объективно классифицировать кератотопограммы. Разрабатывается программное обеспечение, объединяющее кератотопограф и хирургическое оборудование. В будущем такие системы будут использоваться для контроля лазерной коррекции неправильного астигматизма.

Параллельно с совершенствованием систем кератотопографии и их широким применением в исследовательской работе и в хирургической практике возрастает потребность в более дешевом оборудовании меньшего размера, пригодном для применения в неспециализированных лечебных учреждениях.

Литература

