

Оптические аберрации глаза при кератоконусе

В.В. Аверич, Г.Б. Егорова

ФГБНУ «НИИГБ», Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

В обзоре представлены основные понятия о волновом фронте глаза, оптических аберрациях глаза и их изменениях при кератоконусе (КК) — наиболее распространенной форме первичных эктаических заболеваний роговицы. Рассмотрены вопросы влияния задней поверхности роговицы на показатели общего астигматизма и волнового фронта глаза. Авторы отмечают, что возможной причиной увеличения уровня аберраций при КК являются сопутствующие признаки синдрома «сухого глаза» (ССГ). В обзоре обсуждаются методы коррекции аберраций при КК. На сегодняшний день контактная коррекция жесткими газопроницаемыми линзами остается самым эффективным методом зрительной реабилитации. Назначение комбинации слезозаместительных и репаративных препаратов позволяет практически полностью нивелировать явления кератоконъюнктивального ксероза. При наличии у пациента с КК начальных признаков ССГ целесообразно применение бесконсервантных слезозаместителей низкой вязкости на основе гиалуроновой кислоты различной концентрации. В случае использования пациентом контактной коррекции для профилактики гипоксических осложнений обосновано назначение антиоксидантного средства метилэтилпиридинол, оказывающего антиагрегантное и антигипоксическое действие.

Ключевые слова: кератоконус, оптические аберрации глаза, задняя поверхность роговицы, волновой фронт глаза, полиномы Цернике, синдром сухого глаза, антиоксидант.

Для цитирования: Аверич В.В., Егорова Г.Б. Оптические аберрации глаза при кератоконусе. Клиническая офтальмология. 2022;22(3):168–174. DOI: 10.32364/2311-7729-2022-22-3-168-174.

Ocular aberrations in keratoconus

V.V. Averich, G.B. Egorova

Research Institute of Eye Diseases, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The review presents the basic concepts of the wavefront, ocular aberrations and their changes in keratoconus (KC) — the most common form of primary ectatic corneal disorder. It also considers the issues of the posterior corneal surface impact on the indicators of general astigmatism and the wavefront. The authors note that a possible reason for the increase in the aberration level in KC are concomitant signs of dry eye syndrome (DYS). Adding that, the review also discusses methods for correcting aberrations in KC. To date, contact lens vision correction with rigid gas permeable lenses remains the most effective method of visual rehabilitation. The prescription with a combination of artificial tears and reparative medicine allows to almost completely neutralize the phenomena of keratomalacia (conjunctival xerosis). If a patient with KC has initial signs of DYS, it is advisable to use preservative-free low-viscosity artificial tears based on hyaluronic acid of various concentrations. If the patient uses contact lens vision correction to prevent hypoxia complications, it is justified to prescribe the antioxidant agent, methylethylpyridinol, which has an antiaggregational and antihypoxic effect.

Keywords: keratoconus, ocular aberrations, posterior corneal surface, wavefront, Zernike polynomials, dry eye syndrome, antioxidant.

For citation: Averich V.V., Egorova G.B. Ocular aberrations in keratoconus. Russian Journal of Clinical Ophthalmology. 2022;22(3):168–174 (in Russ.). DOI: 10.32364/2311-7729-2022-22-3-168-174.

ВВЕДЕНИЕ

С помощью зрительной перцепции человек получает 80% поступающей информации [1]. Зрительная перцепция включает в себя ряд анатомо-оптических элементов глазного яблока, состояние и сбалансированная работа которых в конечном счете определяют качество изображения, формируемого в центральной ямке сетчатки глаза и обрабатываемого центральным зрительным анализатором. Глаз человека, являясь сложной оптической саморегулирующейся системой, с точки зрения геометрической оптики далек от совершенства и имеет определенный ряд оптических погрешностей [2]. В результате несоответствия оптической системы глаза идеальной физической модели возникают отклонения световых лучей, проходящих че-

рез преломляющие среды глазного яблока, что приводит к формированию так называемых оптических аберраций (от латинского *aberrare* — «уклоняться, заблуждаться»), которые, достигая определенных значений, могут существенно снижать зрительные функции.

ОПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ

«Аберрация — это любое угловое отклонение узкого параллельного пучка света от точки идеального пересечения с фовеолой при его прохождении через всю оптическую систему глаза» [3]. Качество оптической системы обуславливается характеристиками волнового фронта световой волны: «идеальный» глаз с эмметропией, не имею-

ший aberrаций, формирует сферический волновой фронт и обеспечивает полноценную проекцию воспринимаемого изображения точечного источника на макуле, ограниченного только световой дифракцией, — так называемого диска Эйри, размер которого прямо пропорционален диаметру зрачка [3–6].

В 1960 г. голландским физиком и лауреатом Нобелевской премии Фрицем Цернике была предложена аппроксимация aberrаций волнового фронта в математическую систему многочленов или полиномов, которая успешно используется по сей день [7–9]. Данный подход позволяет представить волновой фронт любой сложности как серию полиномов, в полной мере описывающих все входящие в него оптические aberrации. Каждый полином Цернике связан с определенным типом aberrации и выражается в виде моды: Z_n^m , где m — положительное или отрицательное число, описывающее меридиональную частоту моды полинома, а n — целое число, отражающее синусоидальную частоту моды полинома.

Полиномы, как правило, представлены графически в виде пирамиды, каждый уровень которой соответствует определенной степени радиального компонента. В свою очередь, каждая радиальная мода состоит из aberrационных мод с определенной меридиональной частотой (рис. 1).

Оптические aberrации подразделяют на aberrации низшего (1-го и 2-го, или low order aberrations, LOA) и высшего (3-го и 4-го, или high order aberrations, HOA) порядка. Aberrации 1-го порядка, или Tilt, характеризуют дей-

ствие призмы, т. е. наклон относительно вертикальной (Z_1^{-1}) или горизонтальной (Z_1^1) оси. Как и нулевой полином (Z_0^0), Tilt обычно не учитывается при измерении aberrационного волнового фронта. Aberrации 2-го порядка включают в себя дефокус или аметропию (Z_2^0) и астигматизм (Z_2^{-2} , Z_2^2). К наиболее значимым aberrациям 3-го и 4-го порядка относятся кома (Z_3^{-1} , Z_3^1), сферическая aberrация (Z_4^0) и трейfoil (Z_3^{-3} , Z_3^3) [3, 4].

Кома — это сферическая aberrация косых пучков света, падающих под углом к оптической оси глаза. Данный вид aberrаций основывается на асимметрии оптического центра двух главных преломляющих сред глаза с макулой — роговицы и хрусталика [3, 10, 11]. Для сферической aberrации характерно различие в степени преломления параллельных лучей, проходящих на периферии и парацентрально оптической оси, относительно лучей, преломляющихся в центре. Трейfoil — оптическая aberrация, возникающая при нерегулярности поверхности оптических элементов глаза на их периферии и образующая различное линейное оптическое увеличение на разных участках изображения [3, 11].

Помимо основных вышеперечисленных, имеется ряд других aberrаций — вторичная сферическая, вторичная кома, вторичный трейfoil, квадраfoil, пентаfoil и др. В стандарты Американского оптического общества включены aberrации вплоть до 7-го порядка. Однако в ходе проведения клинических исследований было доказано, что при остроте зрения 100% влияние оптических aberrаций выше 4-го порядка на зрительные функции сведено

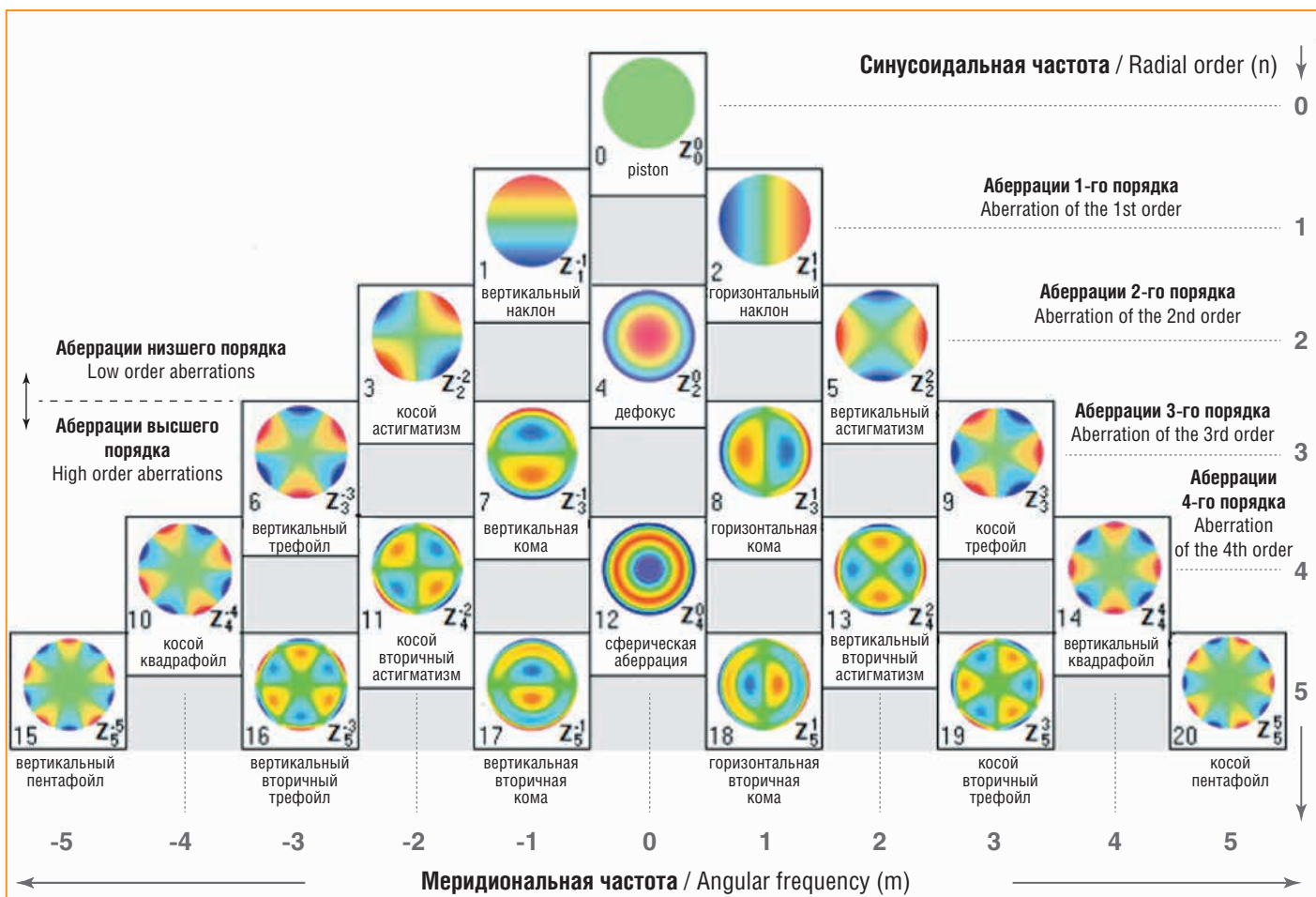


Рис. 1. Пирамида полиномов Цернике до 4-го порядка

Fig. 1. Zernike polynomial pyramid up to the 4th order

к минимуму [12]. Параллельно с этим было доказано, что в условно нормальном глазу с эметропической рефракцией имеется преобладание aberrаций только до 2-го порядка, а все полиномы свыше в среднем стремятся к нулевому значению. Другие исследования также подтверждают данный факт: более 90% от всех aberrаций волнового фронта приходится на aberrации низшего порядка, 80% из них относится к дефокусу или аметропии [13]. Это достигается за счет симметрии расположения оптических центров и прозрачности структур преломляющих сред глаза.

ОПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ПРИ КЕРАТОКОНУСЕ

Известно, что среди всех преломляющих структур глаза наиболее важную роль играет роговая оболочка. Возникновение иррегулярности ее поверхности, оптической неоднородности и нарушение прозрачности слоев роговицы приводят к резкому изменению aberrационной картины волнового фронта глаза в сторону высших порядков [14–17]. В частности, данные изменения роговицы характерны для такого заболевания, как кератоконус (КК) [14–25].

Это заболевание является наиболее распространенной формой первичных эктатических заболеваний роговицы. Характерные клинические проявления КК — топографические изменения формы и толщины роговицы (уменьшение радиуса кривизны и истончение в зоне эктазии), в начальных стадиях процесса приводящие к сдвигу клинической рефракции в сторону миопии и формированию иррегулярного астигматизма, а в терминальных — к снижению прозрачности роговицы.

Изучение КК на основе данных видеокератотопографии передней поверхности роговицы и разложение кератометрических показателей на набор ортогональных полиномов Цернике были впервые предложены в 1992 г. [26]. Позднее накопление клинических данных и развитие методов зондирования волнового фронта позволили получить более точные измерения волновой aberrации при КК [27].

Многочисленные исследования по оценке aberrаций волнового фронта глаза при КК доказали статистически значимое возрастание aberrаций высшего порядка, среди которых наибольшим изменениям подвержен показатель комы [16–25, 28, 29].

В когортном обсервационном исследовании 73 глаз с КК выявлено статистически значимое увеличение общих глазных aberrаций высших порядков: комы, трейфойла и сферической aberrации. Общее среднеквадратичное значение отклонений коэффициентов Цернике 3-го по-

рядка при диаметре зрачка 6 мм составило $0,28 \pm 0,15$ мкм у 870 глаз в группе контроля и $3,10 \pm 2,28$ мкм в группе КК. Помимо этого, в исследовании отмечалось, что aberrационным предиктором КК является вертикальная кома, показавшая специфичность 71,9% и чувствительность 89,3%. При подозрении на субклиническую форму КК показатель вертикальной комы должен быть ниже 0,12 мкм. Для клинической формы характерен показатель 0,3 мкм и ниже [29]. Данное открытие было учтено в дальнейшем в протоколах исследования пациентов с КК.

В литературе встречаются публикации, в которых, напротив, отмечено возрастание aberrаций высших порядков за счет горизонтальной комы [14]. Различная меридиональная частота комаподобных aberrаций может быть связана с топографическими особенностями расположения эктазии и стадией заболевания.

С появлением возможности разделения картины волнового фронта глаза на общие и роговичные aberrации в исследованиях глаз с КК была выявлена существенная корреляция между значениями aberrаций передней поверхности роговицы и общими глазными aberrациями, что позволило сформулировать гипотезу о преобладании роговичного компонента в общем волновом фронте глаза [16, 20]. В более поздних исследованиях эти данные были применены для диагностики субклинического КК. Комбинация видеокератотопографии на основе диска Пласидо с aberrометрией Хартмана — Шака позволила выявить сочетание увеличения значений вертикальной комы и кератотопографических индексов (в частности, индекса Рабиновича, I-S) как характерные паттерны для субклинического и начального КК [22].

Вернемся к определению комаподобных aberrаций: «данный вид aberrаций основывается на асимметрии оптического центра двух главных преломляющих сред глаза с фовеолой — роговицы и хрусталика» [3]. Таким образом, становится вполне объяснимо преобладание данного типа aberrаций высокого порядка при КК. Поступающая световая волна, проходя через иррегулярную поверхность роговицы, будет искажаться в каждой точке такой роговицы по-разному. На рисунке 2 представлена общая aberrационная карта волнового фронта глаза при КК (А) и с условно нормальной роговицей (В) с диаметром зрачка 6 мм. Картина роговичных aberrаций глаза при КК претерпевает значительные изменения (С) в сравнении с нормой (D). С помощью цветового картирования изображаются различные величины ошибок aberrаций высокого порядка: красным и оранжевым цветом обозначаются участки с aberrация-

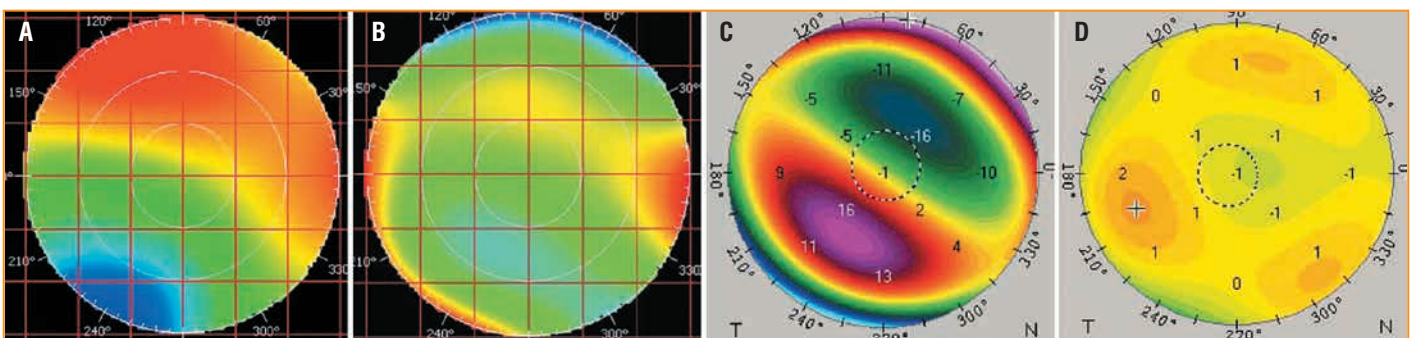


Рис. 2. Абerrационная карта волнового фронта глаза с диаметром зрачка 6 мм. Общие (А) и роговичные aberrации (С) при КК; общие (В) и роговичные aberrации (D) глаза с условно нормальной роговицей [16]

Fig. 2. Wavefront aberration map with a 6 mm diameter pupil. General (A) and corneal aberrations (C) in KC; general (B) and corneal aberrations (D) of an eye with a conditionally normal cornea [16]

ми, имеющими положительные значения, синим и зеленым цветом — участки с отрицательными показателями. Желтым и светло-зеленым цветом указываются участки, где aberrации имеют значения, близкие к нулю. В приведенном примере глаза с КК вклад вертикальных комаподобных aberrаций составил $-1,87$ мкм для общей aberrационной картины (А) и $-2,91$ мкм для роговичной (С) соответственно. Для глаза с условно нормальной роговицей вклад комаподобных aberrаций в общие роговичные составляет в среднем $-0,17$ мкм [16].

Усовершенствование диагностического оборудования дало толчок к дифференциации роговичных aberrаций высших порядков на aberrации передней и задней поверхности. Однако в клинической практике скрининга КК значения aberrаций задней поверхности роговицы уступили по значимости данным aberrаций с ее передней поверхности [30, 31]. Несмотря на это, вопрос влияния задней поверхности роговицы на показатели общего астигматизма и волнового фронта глаза вызывает все больший научный и клинический интерес у офтальмологов [32]. Принято считать, что основной вклад в роговичный астигматизм и показатели aberrационной картины вносит именно передняя поверхность роговицы, в то время как данные задней поверхности практически не учитываются из-за существенной разницы между показателями преломления «воздух — передняя поверхность роговицы» и «задняя поверхность роговицы — водянистая влага» [4, 32].

В первом случае этот показатель составляет $0,376$ ($1,376-1$), а во втором — всего $-0,04$ ($1,336-1,376$). По данным анализа оптических свойств роговицы установлено, что только 10% от ее общей оптической силы приходится на заднюю поверхность [33]. Помимо разницы в рефракционных индексах, такой незначительный вклад обусловлен сферичностью и регулярностью как передней, так и задней поверхности роговицы, а также в некоторой степени их «параллельностью», что не наблюдается при кератэктазии. В ретроспективном исследовании на основе сканирующей кератотопографии по принципу Шаймпфлюга изучено соотношение цилиндрических компонентов передней и задней поверхности роговицы у 1273 пациентов с КК и у 1035 здоровых добровольцев. Средние значения астигматизма передней и задней поверхности в группе с КК составили $4,49 \pm 2,16$ дптр и $0,90 \pm 0,43$ дптр соответственно, что в 4,8 и 3,5 раза превышало эти же значения в сравнении с группой лиц с условно нормальными роговицами [33]. Схожая тенденция выявляется и в другом исследовании [34].

Параллельно с увеличением картометрических значений задней поверхности роговицы возрастает ее вклад и в общий aberrационный фон. В ряде исследований было выявлено, что основную часть внутренних aberrаций глаза при КК составляют aberrации именно задней поверхности роговицы [35, 32]. Средняя среднеквадратичная ошибка aberrаций высшего порядка для задней поверхности роговицы составила $1,04 \pm 0,31$, $0,54 \pm 0,21$ и $0,24 \pm 0,05$ мкм для III, II и I стадий КК соответственно. Для условно нормальных глаз этот показатель соответствовал $0,19 \pm 0,05$ мкм. Среднее среднеквадратичное значение комы как наиболее доминирующей aberrации задней поверхности роговицы в глазах при КК составило $0,93 \pm 0,35$, $0,46 \pm 0,23$ и $0,12 \pm 0,06$ мкм. В группе контроля данный параметр соответствовал $0,09 \pm 0,06$ мкм, т. е. среднеквадратичное значение комы задней поверхности роговицы при КК в 10, 5 и почти 1,5 раза превышало параметры комы условно нормальных роговиц [35].

Также авторами описывается потенциальный эффект самокомпенсации астигматизма и, как следствие, aberrаций роговицы ее поверхностями, аналогичный механизму компенсации хрусталиковых и роговичных aberrаций. От 17% до 20% роговичного астигматизма и до 24% aberrаций типа комы передней поверхности роговицы компенсировалось ее задней поверхностью [35, 36]. Однако на фоне общего повышения этих показателей при КК данный эффект самокомпенсации поверхностями является малозначимым.

Другой потенциальной причиной увеличения уровня aberrаций при КК являются сопутствующие признаки синдрома «сухого глаза» (ССГ) [37]. Слезная пленка — не только первая преломляющая поверхность, с которой сталкивается световой луч при прохождении через все структуры глаза, ее нормальное состояние — один из важных критериев функционирования роговицы как главной преломляющей среды глаза [38]. Стабильная слезная пленка обеспечивает гладкую оптическую поверхность, тем самым сводя к минимуму рассеяние света от передней поверхности роговицы. Исследования показывают, что при любых изменениях стабильности слезной пленки происходит резкое возрастание значений aberrаций высокого порядка [39]. Дополнительным фактором, влияющим на увеличение aberrаций, может служить кератопатия, возникающая на фоне ухудшения состояния слезной пленки [38, 39].

КОМПЕНСАЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ПРИ КЕРАТОКОНУСЕ

Назначение комбинации слезозаместительных и репаративных препаратов позволяет практически полностью нивелировать явления кератоконъюнктивального ксероза. При наличии у пациента с КК начальных признаков ССГ целесообразно применение бесконсервантных слезозаместителей низкой вязкости на основе гиалуроновой кислоты различной концентрации. В случае использования пациентом контактной коррекции для профилактики гипоксических осложнений обосновано назначение метилэтилпиридинола, капли глазные 10 мг/мл (Эмоксипин®) [40, 41], оказывающего антиагрегантное и антигипоксическое действие. Взаимодействуя с перекисными и гидроксильными радикалами липидов, метилэтилпиридинол подавляет свободнорадикальное окисление последних, повышая активность антиоксидантных ферментов, что приводит к стабилизации клеточных мембран и уменьшению апоптоза клеток. В исследовании назначение инстилляций препарата Эмоксипин® 1% пациентам с гипоксическими осложнениями на фоне ношения мягких контактных линз позволило нивелировать гипоксические изменения роговицы и улучшить состояние слезной пленки [41]. Помимо этого, эффективность данного препарата доказана в ряде клинических исследований при комплексном лечении глаукомы, а также различных заболеваний сетчатки [42, 43]. При наличии явлений кератопатии рекомендуется добавление гелевого корнеопротектора, содержащего в своем составе 5% декспантенол, для ускорения процессов эпителизации, восстановления стабильности слезной пленки и, как следствие, уменьшения индуцированных ССГ оптических aberrаций.

Повышение уровня оптических aberrаций при КК приводит к значительному снижению показателей пространственной контрастной чувствительности [2], ухудшению зрительных функций и, как следствие, к зрительной нетрудоспособности [2, 11, 44].

Если говорить о методах компенсации оптических aberrаций при КК, то на сегодняшний день контактная коррекция жесткими газопроницаемыми линзами (ЖГКЛ) остается самым эффективным и предсказуемым в плане функциональных результатов и безопасности методом зрительной реабилитации [45, 46–48].

Доказана возможность значительного снижения уровня aberrаций высших порядков (при I стадии заболевания — на 38,2%, при II стадии — на 55,5%, при III стадии — на 54,9% и на 55,2% при IV стадии) при применении ЖГКЛ, что сопровождается повышением пространственной контрастной чувствительности и зрительной трудоспособности [48]. Помимо этого, ношение ЖГКЛ способствует изменению направления вертикальной комы от -0,185 до 0,134 мкм, а суммарные aberrации высших порядков снижаются с 0,54 до 0,36 мкм [49]. Однако полностью нивелировать влияние aberrаций при помощи ЖГКЛ невозможно. Уровень остаточных aberrаций в ЖГКЛ в ряде случаев остается выше, а зрительная работоспособность — ниже показателей в здоровых глазах [32]. Причинами могут служить ротация и нестабильная посадка ЖГКЛ, износ материала линзы, а также не полностью компенсированные aberrации высшего порядка задней поверхности роговицы [35, 36, 47]. Остаточное среднее значение aberrаций свыше 3-го порядка в ЖГКЛ составляет 0,8, 0,5 и 0,34 мкм для III, II и I стадий КК соответственно [35].

Для минимизации влияния aberrаций волнового фронта глаза и повышения зрительных функций конструкции и материалы ЖГКЛ постоянно совершенствуются. На сегодняшний день перспективным в коррекции aberrаций при КК является применение склеральных жестких газопроницаемых линз (СЖГКЛ) [50]. Благодаря большому диаметру опорная часть линзы располагается на бульбарной конъюнктиве, что обеспечивает ее стабильную посадку на глазу и субъективный комфорт со стороны пациента даже при выраженной деформации роговицы. Наличие так называемого слезного клиренса между задней поверхностью СЖГКЛ и передней поверхностью роговицы позволяет нейтрализовать иррегулярный роговичный астигматизм и индуцируемые им aberrации высших порядков, создавая тем самым единую структуру с меньшими оптическими погрешностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, иррегулярность и высокие значения астигматизма передней и задней поверхности роговицы, возникающие при такой патологии роговицы, как КК, вносят существенный вклад aberrаций высшего порядка в общий aberrационный фон глаза, значительно снижая зрительные функции. Выдвинутая теория происхождения остаточных aberrаций в ЖГКЛ от задней поверхности роговицы при КК требует дальнейшего уточнения как с научной точки зрения, так и с практической (их значимое влияние на остроту зрения). Помимо этого, актуальным остается поиск оптимизации оптической реабилитации при КК, способствующий максимальной нейтрализации роговичных aberrаций высших порядков.

Литература

1. Дегтярев С.А., Карсаков А.В., Бранчевская Е.С. и др. Влияние изменения кривизны преломляющих поверхностей глаза на качество изображения на сетчатке в модели Лиоу-Бреннана. Компьютерная оптика. 2015;39(5):702–708. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-702-708.

- Егорова Г.В., Бобровских Н.В., Зуева Ю.С. Оптические aberrации глаза и возможности их компенсации с помощью контактных линз и хирургических вмешательств при первичных аметропиях и кератоконусе. Вестник офтальмологии. 2007;123(5):47–51.
- Балашевич Л.И. Рефракционная хирургия. СПб.: СПбМАПО; 2002.
- Suliman A., Rubin A. A review of higher order aberrations of the human eye. African Vision and Eye Health. 2019;78(1):a501. DOI: 10.4102/aveh.v78i1.501.
- McAlinden C., McCartney M., Moore J. Mathematics of Zernike polynomials: a review. Clin Exp Ophthalmol. 2011;39(8):820–827. DOI: 10.1111/j.1442-9071.2011.02562.x.
- Applegate R.A., Hilmantel G., Howland H.C. et al. Corneal first surface optical aberrations and visual performance. J Refract Surg. 2000;16(5):507–514. DOI: 10.3928/1081-597X-20000901-04.
- Bille J.F., Harner C.F., Lösel F. Aberration-Free Refractive Surgery: new frontiers in vision. Berlin: Springer Science & Business Media; 2004. DOI: 10.1007/978-3-642-97918-7.
- Zernike F. Beugungstheorie des schneidenerfahrens und seiner verbesserten form, der phasenkontrastmethode. Physical. 1934;1(7):689–704 (in German). DOI: 10.1016/S0031-8914(34)80259-5.
- Thibos L.N., Applegate R.A., Schwiegerling J.T. et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. J Refract Surg. 2002;18(5):S652–S660. DOI: 10.3928/1081-597X-20020901-30.
- Егорова Г.В., Бородина Н.В., Бубнова И.А. Aberrации человеческого глаза, способы их измерения и коррекции (обзор литературы). Клиническая офтальмология. 2003;4(4):30–32.
- Корнюшина Т.А., Розенблюм Ю.З. Aberrации оптической системы глаза человека и их клиническое значение. Вестник оптометрии. 2002;3:13–20.
- Семчишен В., Мрохен М. Особенности aberrаций высших порядков при аметропии и эмметропии. Рефракционная хирургия и офтальмология. 2003;3(3):10–12.
- Villegas E.A., Artal P. Visual acuity and optical parameters in progressive-power lenses. Optom Vis Sci. 2006;83(9):672–681. DOI: 10.1097/01.opx.0000232818.37832.ee.
- Barbero S., Marcos S., Merayo-Llves J., Moreno-Barriuso E. Validation of the estimation of corneal aberrations from videokeratography in keratoconus. J Refract Surg. 2002;18(3):263–270. DOI: 10.3928/1081-597X-20020501-09.
- Gordon-Shaag A., Millodot M., Ifrah R., Sheener E. Aberrations and topography in normal, keratoconus-suspect, and keratoconic eyes. Optometry and Vision Science. 2012;89(4):411–418. DOI: 10.1097/OPX.0b013e318249d727.
- Jinabhai A., Radhakrishnan H., O'Donnell C. Higher order aberrations in keratoconus: A review. Optometry in Practice. 2009;10:141–160.
- Colak H.N., Kantarci F.A., Yildirim A. et al. Comparison of corneal topographic measurements and high order aberrations in keratoconus and normal eyes. Cont Lens Anterior Eye. 2016;39(5):380–384. DOI: 10.1016/j.clae.2016.06.005.
- Castillo J.H., Hanna R., Berkowitz E., Tiosano B. Wavefront analysis for keratoconus. Int J Kerat Ect Cor Dis. 2014;3(2):76–83. DOI: 10.5005/jp-journals-10025-1083.
- Bühren J., Kühne C., Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. Am J Ophthalmol. 2007;143(3):381–389. DOI: 10.1016/j.ajo.2006.11.062.
- Maeda N., Fujikado T., Kuroda T. et al. Wavefront aberrations measured with Hartmann-Shack sensor in patients with keratoconus. Ophthalmology. 2002;109(11):1996–2003. DOI: 10.1016/S0161-6420(02)01279-4.
- Alió J.L., Shabayek M.H. Corneal higher order aberrations: a method to grade keratoconus. J Refract Surg. 2006;22(6):539–545. DOI: 10.3928/1081-597X-20060601-05.
- Jafri B., Li X., Yang H., Rabinowitz Y.S. Higher order wavefront aberrations and topography in early and suspected keratoconus. J Refract Surg. 2007;23(8):774–781. DOI: 10.3928/1081-597X-20071001-06.
- Lim L., Wei R.H., Chan W.K., Tan D.T. Evaluation of higher order ocular aberrations in patients with keratoconus. J Refract Surg. 2007;23(8):825–828. DOI: 10.3928/1081-597X-20071001-13.
- Schlegel Z., Lteif Y., Bains H.S., Gatinel D. Total, corneal, and internal ocular optical aberrations in patients with keratoconus. J Refract Surg. 2009;25(10 Suppl):S951–S957. DOI: 10.3928/1081597X-20090915-10.
- Radhakrishnan H., Jinabhai A., O'Donnell C. Dynamics of ocular aberrations in keratoconus. Clin Exp Optom. 2010;93(3):164–174. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2010.00471.x.
- Howland H.C., Glasser A., Applegate R.A. Polynomial approximations of corneal surfaces and corneal curvature topography. Technical Digest Ser Ophthalm Vis Optics OSA. 1992;3:34–37.
- Schwiegerling J., Greivenkamp J.E. Keratoconus detection based on videokeratoscopic height data. Optom Vis Sci. 1996;73(12):721–728. DOI: 10.1097/00006324-199612000-00001.
- Maeda N. Clinical applications of wavefront aberrometry — a review. Clin Exp Ophthalmol. 2009;37(1):118–129. DOI: 10.1111/j.1442-9071.2009.02005.x.
- Gobbe M., Guillon M. Corneal wavefront aberration measurements to detect keratoconus patients. Cont Lens Anterior Eye. 2005;28(2):57–66. DOI: 10.1016/j.clae.2004.12.001.
- Bühren J., Kook D., Yoon G., Kohnen T. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2010;51(7):3424–3432. DOI: 10.1167/iovs.09-4960.
- Piñero D.P., Alió J.L., Alesón A. et al. Pentacam posterior and anterior corneal aberrations in normal and keratoconic eyes. Clin Exp Optom. 2009;92(3):297–303. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2009.00357.x.
- Nakagawa T., Maeda N., Kosaki R. et al. Higher-order aberrations due to the posterior corneal surface in patients with keratoconus. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2009;50(6):2660–2665. DOI: 10.1167/iovs.08-2754.

33. Mas D., Espinosa J., Domenech B. et al. Correlation between the dioptric power, astigmatism and surface shape of the anterior and posterior corneal surfaces. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2009;29(3):219–226. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2008.00632.x.
34. Naderan M., Rajabi M.T., Zarrinbakhsh P. Distribution of Anterior and Posterior Corneal Astigmatism in Eyes With Keratoconus. *Am J Ophthalmol.* 2016;167:79–87. DOI: 10.1016/j.ajo.2016.03.051.
35. Chen M., Yoon G. Posterior corneal aberrations and their compensation effects on anterior corneal aberrations in keratoconic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008;49(12):5645–5652. DOI: 10.1167/iovs.08-1874.
36. Chen M., Sabesan R., Ahmad K., Yoon G. Correcting anterior corneal aberration and variability of lens movements in keratoconic eyes with back-surface customized soft contact lenses. *Opt Lett.* 2007;32(21):3203–3205. DOI: 10.1364/ol.32.003203.
37. Бубнова И.А., Аверич В.В. Состояние прекорнеальной слезной пленки при кератоконусе. Современные технологии в офтальмологии. 2020;4(35):319–320. DOI: 10.25276/2312-4911-2020-4-319-320.
38. Suliman A., Rubin A. Corrigendum: A review of higher order aberrations of the human eye. *African Vision and Eye Health.* 2019;78(1):a550. DOI: 10.4102/aveh.v78i1.550.
39. Koh S., Maeda N., Hirohara Y. et al. Serial measurements of higher-order aberrations after blinking in patients with dry eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008;49(1):133–138. DOI: 10.1167/iovs.07-0762.
40. Трегубова И.А., Косолапов В.А., Спасов А.А. Антиоксиданты: современное состояние и перспективы. Успехи физиологических наук. 2012;43(1):75–94.
41. Курешева А.П., Кидралева С.Р. Лечение гипоксических изменений роговицы у пациентов с контактной коррекцией зрения. *Глаз.* 2014;6(100):13–17.
42. Даутова З.А., Митрофанова Н.В. Применение препарата Эмоксипин в комплексном лечении глаукомы. *Практическая медицина.* 2016;1(2):153–159.
43. Козлов С.А., Хышиктуев Б.С., Логунов Н.А. Влияние комплексной терапии с эмоксипином на течение диабетической ретинопатии. *Вестник офтальмологии.* 2003;119(2):28–30.
44. Корниловский И.М., Годжаева А.М. Новый биоптический подход к оценке оптических aberrаций глаза и восстановительной коррекции зрения. *Рефракционная хирургия и офтальмология.* 2006;6(1):4–12.
45. Jenkins T.C. Aberrations of the eye and their effects on vision: 1. Spherical aberration. *The Br J Physiol Opt.* 1963;20:59–91.
46. Kosaki R., Maeda N., Bessho K. et al. Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2007;48(7):3062–3068. DOI: 10.1167/iovs.06-1285.
47. Marsack J.D., Parker K.E., Pesudovs K. et al. Uncorrected wavefront error and visual performance during RGP wear in keratoconus. *Optom Vis Sci.* 2007;84(6):463–470. DOI: 10.1097/OPX.0b013e31802e64f0.
48. Егорова Г.Б., Бобровских Н.В., Савочкина О.А. Возможности компенсации оптических aberrаций при кератоконусе с помощью жестких газопроницаемых контактных линз. *Вестник офтальмологии.* 2010;126(1):42–46.
49. Choi J., Wee W.R., Lee J.H., Kim M.K. Changes of ocular higher order aberration in on- and off-eye of rigid gas permeable contact lenses. *Optom Vis Sci.* 2007;84(1):42–51. DOI: 10.1097/01.opx.0000254036.45989.65.
50. Fuller D.G., Wang Y. Safety and Efficacy of Scleral Lenses for Keratoconus. *Optom Vis Sci.* 2020;97(9):741–748. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001578.
13. Villegas E.A., Artal P. Visual acuity and optical parameters in progressive-power lenses. *Optom Vis Sci.* 2006;83(9):672–681. DOI: 10.1097/01.opx.0000232818.37832.ee.
14. Barbero S., Marcos S., Merayo-Llodes J., Moreno-Barriuso E. Validation of the estimation of corneal aberrations from videokeratography in keratoconus. *J Refract Surg.* 2002;18(3):263–270. DOI: 10.3928/1081-597X-20020501-09.
15. Gordon-Shaag A., Millodot M., Ifrah R., Shneur E. Aberrations and topography in normal, keratoconus-suspect, and keratoconic eyes. *Optometry and Vision Science.* 2012;89(4):411–418. DOI: 10.1097/OPX.0b013e318249d727.
16. Jinabhai A., Radhakrishnan H., O'Donnell C. Higher order aberrations in keratoconus: A review. *Optometry in Practice.* 2009;10:141–160.
17. Colak H.N., Kantarci F.A., Yildirim A. et al. Comparison of corneal topographic measurements and high order aberrations in keratoconus and normal eyes. *Cont Lens Anterior Eye.* 2016;39(5):380–384. DOI: 10.1016/j.clae.2016.06.005.
18. Castillo J.H., Hanna R., Berkowitz E., Tiosano B. Wavefront analysis for keratoconus. *Int J Kerat Ect Cor Dis.* 2014;3(2):76–83. DOI: 10.5005/jp-journals-10025-1083.
19. Bühren J., Kühne C., Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. *Am J Ophthalmol.* 2007;143(3):381–389. DOI: 10.1016/j.ajo.2006.11.062.
20. Maeda N., Fujikado T., Kuroda T. et al. Wavefront aberrations measured with Hartmann-Shack sensor in patients with keratoconus. *Ophthalmology.* 2002;109(11):1996–2003. DOI: 10.1016/S0161-6420(02)01279-4.
21. Alió J.L., Shabayek M.H. Corneal higher order aberrations: a method to grade keratoconus. *J Refract Surg.* 2006;22(6):539–545. DOI: 10.3928/1081-597X-20060601-05.
22. Jafri B., Li X., Yang H., Rabinowitz Y.S. Higher order wavefront aberrations and topography in early and suspected keratoconus. *J Refract Surg.* 2007;23(8):774–781. DOI: 10.3928/1081-597X-20071001-06.
23. Lim L., Wei R.H., Chan W.K., Tan D.T. Evaluation of higher order ocular aberrations in patients with keratoconus. *J Refract Surg.* 2007;23(8):825–828. DOI: 10.3928/1081-597X-20071001-13.
24. Schlegel Z., Lteif Y., Bains H.S., Gatineau D. Total, corneal, and internal ocular optical aberrations in patients with keratoconus. *J Refract Surg.* 2009;25(10 Suppl):S951–S957. DOI: 10.3928/1081597X-20090915-10.
25. Radhakrishnan H., Jinabhai A., O'Donnell C. Dynamics of ocular aberrations in keratoconus. *Clin Exp Optom.* 2010;93(3):164–174. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2010.00471.x.
26. Howland H.C., Glasser A., Applegate R.A. Polynomial approximations of corneal surfaces and corneal curvature topography. *Technical Digest Ser Ophthalm Vis Optics OSA.* 1992;3:34–37.
27. Schwiegerling J., Greivenkamp J.E. Keratoconus detection based on videokeratographic height data. *Optom Vis Sci.* 1996;73(12):721–728. DOI: 10.1097/00006324-199612000-00001.
28. Maeda N. Clinical applications of wavefront aberrometry — a review. *Clin Exp Ophthalmol.* 2009;37(1):118–129. DOI: 10.1111/j.1442-9071.2009.02005.x.
29. Gobbe M., Guillon M. Corneal wavefront aberration measurements to detect keratoconus patients. *Cont Lens Anterior Eye.* 2005;28(2):57–66. DOI: 10.1016/j.clae.2004.12.001.
30. Bühren J., Kook D., Yoon G., Kohnen T. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2010;51(7):3424–3432. DOI: 10.1167/iovs.09-4960.
31. Piñero D.P., Alió J.L., Alesón A. et al. Pentacam posterior and anterior corneal aberrations in normal and keratoconic eyes. *Clin Exp Optom.* 2009;92(3):297–303. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2009.00357.x.
32. Nakagawa T., Maeda N., Kosaki R. et al. Higher-order aberrations due to the posterior corneal surface in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2009;50(6):2660–2665. DOI: 10.1167/iovs.08-2754.
33. Mas D., Espinosa J., Domenech B. et al. Correlation between the dioptric power, astigmatism and surface shape of the anterior and posterior corneal surfaces. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2009;29(3):219–226. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2008.00632.x.
34. Naderan M., Rajabi M.T., Zarrinbakhsh P. Distribution of Anterior and Posterior Corneal Astigmatism in Eyes With Keratoconus. *Am J Ophthalmol.* 2016;167:79–87. DOI: 10.1016/j.ajo.2016.03.051.
35. Chen M., Yoon G. Posterior corneal aberrations and their compensation effects on anterior corneal aberrations in keratoconic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008;49(12):5645–5652. DOI: 10.1167/iovs.08-1874.
36. Chen M., Sabesan R., Ahmad K., Yoon G. Correcting anterior corneal aberration and variability of lens movements in keratoconic eyes with back-surface customized soft contact lenses. *Opt Lett.* 2007;32(21):3203–3205. DOI: 10.1364/ol.32.003203.
37. Бубнова И.А., Аверич В.В. Status of precorneal tear film in keratoconus. *Modern technologies in ophthalmology.* 2020;4(35):319–320 (in Russ.). DOI: 10.25276/2312-4911-2020-4-319-320.
38. Suliman A., Rubin A. Corrigendum: A review of higher order aberrations of the human eye. *African Vision and Eye Health.* 2019;78(1):a550. DOI: 10.4102/aveh.v78i1.550.
39. Koh S., Maeda N., Hirohara Y. et al. Serial measurements of higher-order aberrations after blinking in patients with dry eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008;49(1):133–138. DOI: 10.1167/iovs.07-0762.
40. Трегубова И.А., Косолапов В.А., Спасов А.А. Antioxidants: current situation and perspectives. *Progress in physiological science.* 2012;43(1):75–94 (in Russ.).
41. Kurysheva A.P., Kidraleeva S.R. Treatment of hypoxic corneal changes in patients with contact vision correction. *Glaz.* 2014;6(100):13–17 (in Russ.).
42. Dautova Z.A., Mitrofanova N.V. Application of the drug Emoxipine in comprehensive treatment of glaucoma. *Prakticheskaya meditsina.* 2016;1(2):153–159 (in Russ.).

References

1. Degtyarev S.A., Karsakov A.V., Branchevskaya E.S. et al. Influence of eye refractive surface curvature modification on the retinal image quality in the Liou-Brennan eye model. *Computer Optics.* 2015;39(5):702–708 (in Russ.). DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-702-708.

2. Egorova G.V., Bobrovskikh N.V., Zueva Yu.S. Optical aberrations of the eye and feasibility of their compensation by means of contact lenses and surgical interventions in primary ametropias and keratoconus. *The Russian annals of ophthalmology.* 2007;5:47–51 (in Russ.).

3. Balashevich L. I. *Refractive surgery.* SPb.: SPbMAPO; 2002 (in Russ.).

4. Suliman A., Rubin A. A review of higher order aberrations of the human eye. *African Vision and Eye Health.* 2019;78(1):a501. DOI: 10.4102/aveh.v78i1.501.

5. McAlinden C., McCartney M., Moore J. Mathematics of Zernike polynomials: a review. *Clin Exp Ophthalmol.* 2011;39(8):820–827. DOI: 10.1111/j.1442-9071.2011.02562.x.

6. Applegate R.A., Hilmantel G., Howland H.C. et al. Corneal first surface optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg.* 2000;16(5):507–514. DOI: 10.3928/1081-597X-20000901-04.

7. Bille J.F., Harner C.F., Lösel F. *Aberration-Free Refractive Surgery: new frontiers in vision.* Berlin : Springer Science & Business Media; 2004. DOI: 10.1007/978-3-642-97918-7.

8. Zernike F. Beugungstheorie des schneidener-fahrens und seiner verbesserten form, der phasenkontrastmethode. *Physical.* 1934;1(7):689–704 (in German). DOI: 10.1016/S0031-8914(34)80259-5.

9. Thibos L.N., Applegate R.A., Schwiegerling J.T. et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg.* 2002;18(5):S652–S660. DOI: 10.3928/1081-597X-20020901-30.

10. Egorova G.B., Borodina N.V., Bubnova I.A. Aberrations of the human eye, methods for their measurement and correction (literature review). *Russian Journal of Clinical Ophthalmology.* 2003;4(4):30–32 (in Russ.).

11. Kornysheva T.A., Rozenblyum Yu.Z. Aberrations of the human eye optical system and their clinical significance. *Vestnik optometrii.* 2002;3:13–20 (in Russ.).

12. Semchishen V., Mrokhon M. Features of higher order aberrations in ametropia and emmetropia. *Refraktsionnaya khirurgiya i oftal'mologiya.* 2003;(3)3:10–12 (in Russ.).

43. Kozlov S.A., Khyshiktuev B.S., Logunov N.A. The influence of complex therapy by emoxipin on the course of diabetic retinopathy. *The Russian annals of ophthalmology*. 2003;119(2):28–30 (in Russ.).
44. Kornilovskii I.M., Godzhaeva A.M. New bioptic approach to evaluation of optic aberrations and restorative vision correction. *Refraktsionnaya khirurgiya i oftal'mologiya*. 2006;6(1):4–12 (in Russ.).
45. Jenkins T.C. Aberrations of the eye and their effects on vision: 1. Spherical aberration. *The Br J Physiol Opt*. 1963;20:59–91.
46. Kosaki R., Maeda N., Bessho K. et al. Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007;48(7):3062–3068. DOI: 10.1167/iov.06-1285.
47. Marsack J.D., Parker K.E., Pesudovs K. et al. Uncorrected wavefront error and visual performance during RGP wear in keratoconus. *Optom Vis Sci*. 2007;84(6):463–470. DOI: 10.1097/OPX.0b013e31802e64f0.
48. Egorova G.B., Bobrovskikh N.V., Savochkina O.A. Possibilities of compensation of optical aberrations in keratoconus with rigid gas-permeable contact lenses. *The Russian annals of ophthalmology*. 2010;126(1):42–46 (in Russ.).
49. Choi J., Wee W.R., Lee J.H., Kim M.K. Changes of ocular higher order aberration in on- and off-eye of rigid gas permeable contact lenses. *Optom Vis Sci*. 2007;84(1):42–51. DOI: 10.1097/01.opx.0000254036.45989.65.
50. Fuller D.G., Wang Y. Safety and Efficacy of Scleral Lenses for Keratoconus. *Optom Vis Sci*. 2020;97(9):741–748. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001578.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Аверич Вероника Валерьевна — к.м.н., младший научный сотрудник отдела рефракционных нарушений ФГБНУ «НИИГБ»; 119021, Россия, г. Москва, ул. Россолимо, д. 11А, Б; ORCID iD 0000-0001-5778-4123.

Егорова Галина Борисовна — д.м.н., главный научный сотрудник отдела рефракционных нарушений ФГБНУ «НИИГБ»; 119021, Россия, г. Москва, ул. Россолимо, д. 11А, Б; ORCID iD 0000-0001-8557-0288.

Контактная информация: Аверич Вероника Валерьевна, e-mail: veronikky@mail.ru.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.12.2021.

Поступила после рецензирования 08.01.2022.

Принята в печать 27.01.2022.

ABOUT THE AUTHORS:

Veronika V. Averich — C. Sc. (Med.), Junior Researcher of the Department of Refractive Disorders, Research Institute of Eye Diseases; 11A, B, Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation; ORCID iD 0000-0001-5778-4123.

Galina B. Egorova — Dr. Sc. (Med.), Leading Researcher of the Department of Refractive Disorders, Research Institute of Eye Diseases; 11A, B, Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation; ORCID iD 0000-0001-8557-0288.

Contact information: Veronika V. Averich, e-mail: veronikky@mail.ru.

Financial Disclosure: no authors have a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

Received 10.12.2021.

Revised 08.01.2022.

Accepted 27.01.2022.