

## АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ РОГОВИЦЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА

П.А. Хорин<sup>1</sup>, С.Н. Хонина<sup>1,2</sup>, А.В. Карсаков<sup>1</sup>, С.Л. Бранчевский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>3</sup> Глазная клиника Бранчевского, Самара, Россия

### Аннотация

В данной работе проведен анализ aberrаций роговицы человеческого глаза на основе данных, полученных в глазной клинике Бранчевского осенью 2016 года. Анализ выполнен на основе представления aberrаций в виде суперпозиции функций Цернике. В результате анализа выделены базисные функции Цернике, наиболее характерные для некоторых патологий глаза.

**Ключевые слова:** aberrации роговицы, функции Цернике, функция рассеяния точки, мопия человеческого глаза.

**Цитирование:** Хорин, П.А. Анализ aberrаций роговицы человеческого глаза / П.А. Хорин, С.Н. Хонина, А.В. Карсаков, С.Л. Бранчевский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 810-817. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-810-817.

### Введение

Человеческий глаз может быть описан как система линз, состоящая из 3 основных компонентов: роговицы, зрачка и хрусталика [1]. Все оптические характеристики нормального глаза определяются комбинацией aberrаций роговицы и внутриглазной оптики.

Исследования [2–4] показали, что общий объем волновой aberrации во всем глазу всегда меньше, чем aberrации передней части роговицы или внутренней оптики. Данный эффект объясняется процессом компенсации между роговицей и хрусталиком [5]. Существуют убедительные доказательства компенсации aberrаций между роговицей и внутриглазной оптикой в случае астигматизма, комы и сферической aberrации [6]. Общим результатом процесса компенсации является снижение величины этих aberrаций в плоскости сетчатки глаза с возможным улучшением оптического качества изображения в фовеоле. Как правило, у молодых людей величина aberrации в роговице и хрусталике больше, чем во всем глазу. Это подтверждает предположение, что хрусталик глаза имеет значительную роль при компенсации aberrаций роговицы, что приводит к улучшению изображений на сетчатке глаза.

В данной работе особое внимание уделяется именно передней и задней поверхности роговицы, так как aberrации этих поверхностей очень важны при формировании изображения оптической системой глаза. Кроме того, коррекцию именно этих поверхностей удобно осуществлять при оперативных вмешательствах [7–9].

### 1. Описание aberрометров

Для получения данных по aberrациям оптической системы глаза использовались aberрометры глазной клиники Бранчевского: WaveLight Oculyzer II и HD Analyzer.

WaveLight Oculyzer II – это диагностический прибор, разработанный для определения характеристик и исследования глаза. Он разработан для визуализации передней части глаза, которая включает: роговицу, зрачок, переднюю камеру и хрусталик глаза (рис. 1). Это устройство измеряет форму роговой оболочки и разработано специально для офтальмологов. Главным

преимуществом для данной исследовательской работы является то, что WaveLight Oculyzer II выполняет анализ передней и задней поверхностей роговицы и позволяет получить разложение по функциям Цернике (рис. 2).

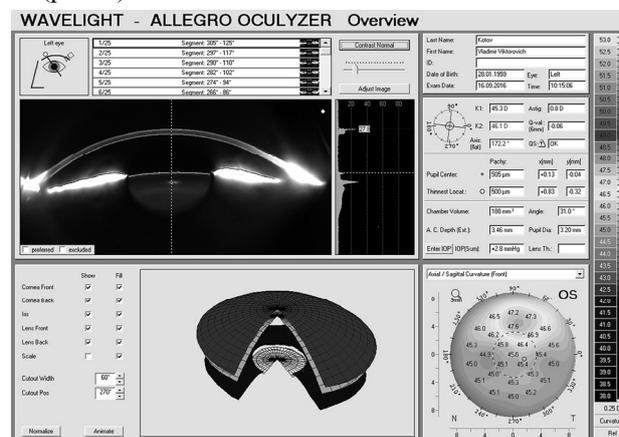


Рис. 1. Сводный отчет о работе прибора WaveLight Oculyzer II

Коэффициенты разложения волнового фронта по ортогональным функциям Цернике [10] позволяют определить среднеквадратическую ошибку отклонения от идеального фронта. Aberrация волнового фронта определяется как отклонение этого волнового фронта от опорной поверхности (идеальная волна). Исходная поверхность обычно определяется как поверхность кривизны волнового фронта, происхождение которого находится в Гауссовой точке изображения (где свет был бы сосредоточен, если глаз был бы идеальным).

Оценка качества изображения состоит в наблюдении тестового объекта, измерении фотометрических характеристик, а также определении функции рассеяния точки (ФРТ) и функции рассеяния линии. На практике именно эти характеристики показывают количественно качество изображения оптической системы. Методы оценки качества изображения такого рода имеют одно большое достоинство – они учитывают все без исключения факторы, которые участвуют в формировании структуры реального оптического изображения.

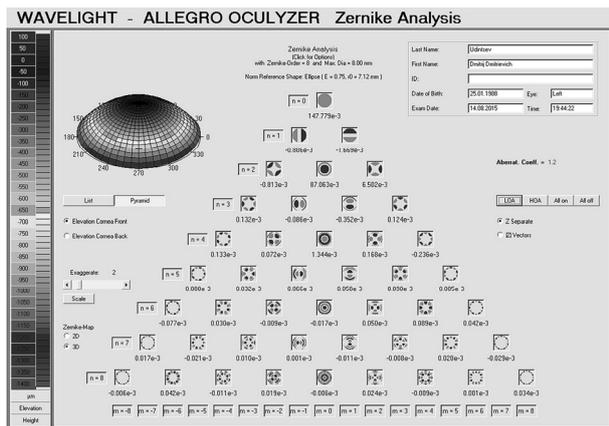


Рис. 2. Пирамида Цернике с весовыми коэффициентами для передней поверхности роговицы

Экспериментально найденная ФРТ характеризует качество системы. Она позволяет учитывать все особенности волновой поверхности, сформированной системой, включая характер микрорельефа оптических поверхностей, в том числе задней и передней поверхностей роговицы [11].

Также в работе используются данные, полученные регистрирующим прибором HD Analyzer. Это инструмент, основанный на технике двойного прохода света, который обеспечивает объективную клиническую оценку качества оптики глаза.

Источник света проецируется на сетчатку. При этом свет проходит через среду глаза дважды: до и после отражения от сетчатки. HD Analyzer анализирует размер и форму отраженного светового пятна.

Оптическая схема прибора показана на рис. 3. Источником света является лазерный диод с длиной волны 780 нм. Световой луч фильтруется и коллимируется с помощью L1. После того как луч отразится и пройдет через расщепитель лучей BS, он проходит через ахроматические линзы L2 и L3 и через корректор FC (с двумя прилегающими зеркалами) с варьируемым фокусом [12].

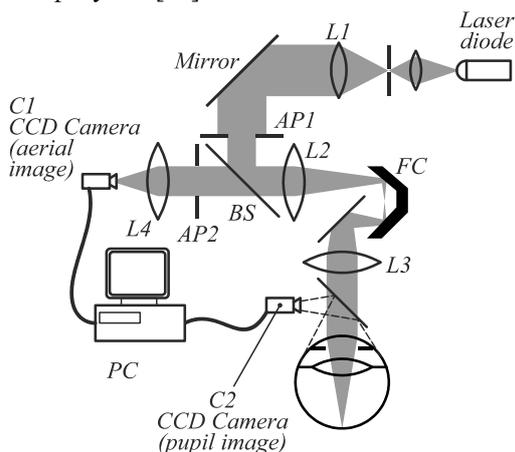


Рис. 3. Типовая схема прибора HD Analyzer

Сферическая рефракция глаза пациента корректируется путем изменения оптических путей между L2 и L3.

Изображения HD Analyzer содержат информацию о качестве оптической системы глаза, включая aberrации

высшего порядка, но при этом визуализируется только ФРТ (рис. 4), а вклад отдельных aberrаций не детализируется. Aberrации высшего порядка важны для рефракционной хирургии.

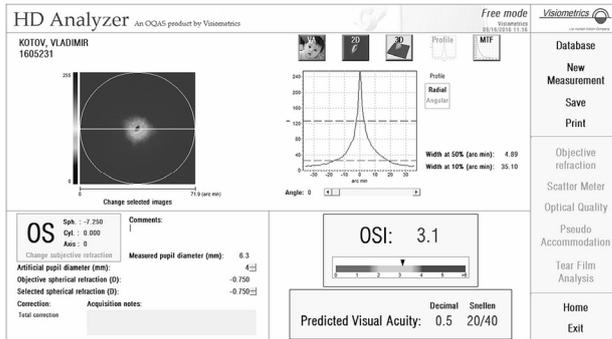


Рис. 4. Сводный отчет о работе прибора HD Analyzer

### 2. Типичные aberrации

Каждая функция базиса Цернике связана с особым типом оптической ошибки или отклонением волнового фронта (табл. 1). Отклонения могут быть описаны как комбинация основных aberrаций, которые более знакомы профессионалам в офтальмологии.

Табл. 1. Соответствие функций Цернике типам aberrаций

N	n	m	Тригонометрическое представление	Вид aberrации
1	0	0	1	Constant
2	1	-1	2r sin(θ)	Tilt
3	1	1	2r cos(θ)	Tilt
4	2	-2	√6 r <sup>2</sup> sin(2θ)	Astigmatism
5	2	0	√3 (2r <sup>2</sup> - 1)	Defocus
6	2	2	√6 r <sup>2</sup> cos(2θ)	Astigmatism
7	3	-3	2√2 r <sup>3</sup> sin(3θ)	Zero curvature Coma (Trefoil)
8	3	-1	2√2 (3r <sup>3</sup> - 2r) sin(θ)	Pure coma
9	3	1	2√2 (3r <sup>3</sup> - 2r) cos(θ)	Pure coma
10	3	3	2√2 r <sup>3</sup> cos(3θ)	Zero curvature Coma (Trefoil)
11	4	-4	√10 r <sup>4</sup> sin(4θ)	Quadrofoil
12	4	-2	√10 (4r <sup>4</sup> - 3r <sup>2</sup> ) sin(2θ)	2 <sup>th</sup> order Astigmatism
13	4	0	√5 (6r <sup>4</sup> - 6r <sup>2</sup> + 1)	Spherical
14	4	2	√10 (4r <sup>4</sup> - 3r <sup>2</sup> ) cos(2θ)	2 <sup>th</sup> order Astigmatism
15	4	4	√10 r <sup>4</sup> cos(4θ)	Quadrofoil

В данной работе рассматриваются функции Цернике в следующем виде:

$$Z_{nm}(r, \varphi) = \sqrt{\frac{n+1}{\pi r_0^2}} R_n^m(r) \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases}, \tag{1}$$

где R<sub>n</sub><sup>m</sup>(r) – радиальные полиномы Цернике.

Порядок нумерации и нормировка функций Цернике может осуществляться различными способами, поэтому в каждом случае необходимо это специально оговаривать.

Аберрации волнового фронта, встречающиеся в оптических системах, обычно описываются в терминах функций Цернике следующим образом [10]:

$$W(r, \varphi) = \exp[i\psi(r, \varphi)], \tag{2}$$

$$\psi(r, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_{nm} Z_{nm}(r, \varphi). \tag{3}$$

Для удобного визуального представления на рис. 5 показана «пирамида Цернике», состоящая из нескольких первых функций Цернике. По вертикали изменяются радиальные номера от  $n=0$  до 4, а по горизонтали – азимутальные номера от  $m=-n$  до  $m=n$ .

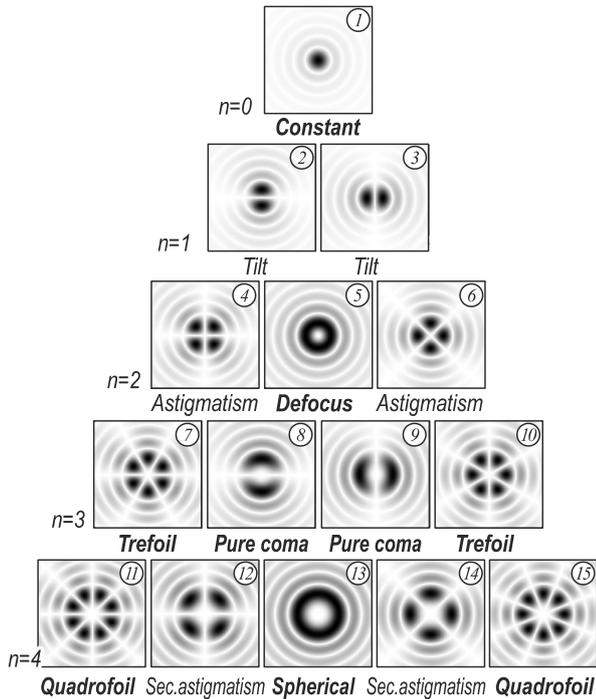


Рис. 5. Вид нескольких функций Цернике

Для построения картин ФРТ в присутствии типичных aberrаций мы использовали простейшую оптическую систему Фурье-коррелятора в среде Zemax [13].

В оптической схеме, приведённой на рис. 6, использованы 2 одинаковых линзы из стекла BK8.

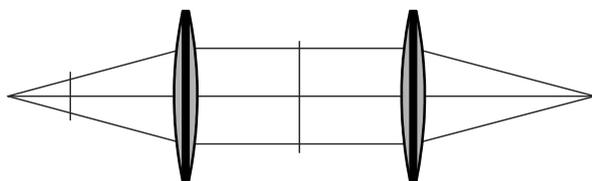


Рис. 6. Оптическая схема Фурье-коррелятора

По центру схемы расположена апертурная диафрагма системы радиусом 3 мм. Длина волны при моделировании составляла 780 нм. При задании радиуса нормировки для полиномов Цернике использовался не радиус линзы, а радиус выходного зрачка, рассчитанный Zemax, который составил 8,37 мм.

К первой поверхности второй линзы была добавлена aberrация в виде комы третьего порядка (рис. 7), соответствующая функции Цернике (3,1) (коэффициент выбран равным 1).

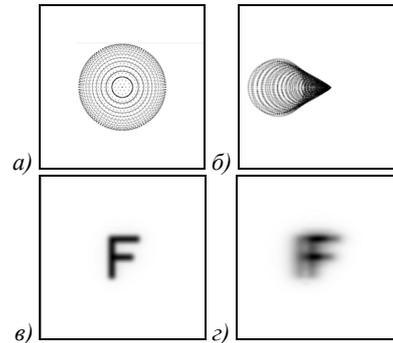


Рис. 7. ФРТ при отсутствии aberrации (а), кома (б) и соответствующие тестовые изображения (в, г)

Для моделирования подобной системы воспользуемся следующим алгоритмом. Построим волновой фронт как суперпозицию полиномов Цернике с использованием формул (1)–(3). Затем вычислим ФРТ как преобразование Фурье от функции зрачка (2) в когерентном случае. Для удобного визуального представления на рис. 8 показана «пирамида ФРТ», соответствующая пирамиде Цернике.

Когерентная ФРТ (рис. 8), полученная с помощью преобразования Фурье, близка к aberrационным кривым (рис. 7), полученным моделированием в среде Zemax.

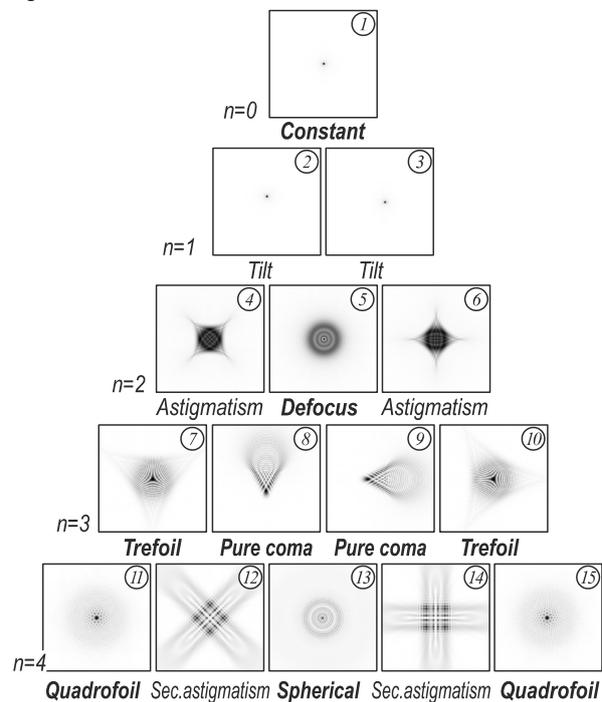


Рис. 8. Вид ФРТ, соответствующих типичным aberrациям

Заметим, что, кроме нумерации и нормировки, функции Цернике могут отличаться по угловой зависимости. В частности, для анализа волнового фронта с помощью многоканальных дифракционных оптических элементов [14–17] рассматривались как экспо-

ненциальная, так и тригонометрическая угловая зависимость. Причем в первом случае имеет место инвариантность базиса Цернике к повороту [18]. Во втором случае при повороте картины (рис. 9) будут меняться коэффициенты при базисных функциях.

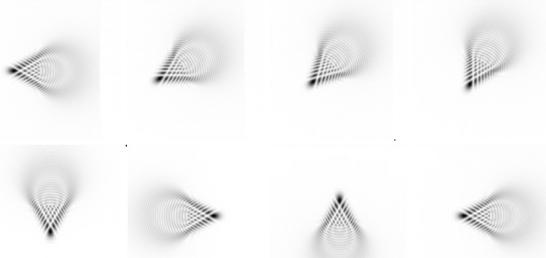


Рис. 9. Поворот ФРТ функции Цернике  $n = 3, m = 1, \varphi_0 = \{0, \pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi\}$

Возможность учета поворота поля на угол  $\varphi_0$  предоставляет следующая суперпозиция:

$$\psi(r, \varphi) = R_{nm}(r) [a \sin(m\varphi) + b \cos(m\varphi)], \quad (4)$$

где  $a = \sin(|m|\varphi_0), b = \cos(|m|\varphi_0), \varphi_0 \in [0; 2\pi]$ .

### 3. Основные aberrации оптической системы глаза

В исследовании использовались данные, полученные в глазной клинике Бранчевского осенью 2016 года, как для условно здоровых людей (без выраженных патологий как на зрачке, так и на хрусталике), так и с определенными патологиями, в частности, с миопией слабой и средней степени.

Роговица (включая слезную пленку) является доминирующей структурой оптической силы глаза (в среднем около 70%). Соответственно, является основным источником aberrаций в глазу. Передняя поверхность роговицы имеет вытянутый профиль; то есть центральная область является более крутой, чем на периферии. Эта форма помогает уменьшить величину сферических aberrаций во всем глазу. Однако формы роговицы значительно отличаются у разных людей, и это приводит к астигматизму и асимметричным aberrациям высокого порядка (например, кома).

Эталонная модель роговицы может быть сферой, эллипсоидом со средней эксцентricностью, равной измеренной, или эллипсоидом с эксцентricностью 0,75. Эталонная модель всегда аксиально симметричная, и ее форма влияет только на коэффициенты аксиально симметричных функций Цернике (1) с номерами  $(n, 0)$ .

Центральный радиус эталонной модели всегда принимается как средний центральный радиус измерения. В отсутствие эталонной модели самый большой вклад в форму роговой оболочки вносится компонентом, соответствующим функции Цернике (2, 0) (параболоид), так как этот компонент имеет самое большое сходство с формой роговой оболочки.

На рис. 10 показана оптическая схема, позволяющая реализовать простейшую модель глаза в Zemax [18]. Длина волны при моделировании составляла

780 нм (такая же длина волны используется прибором HD Analyzer).

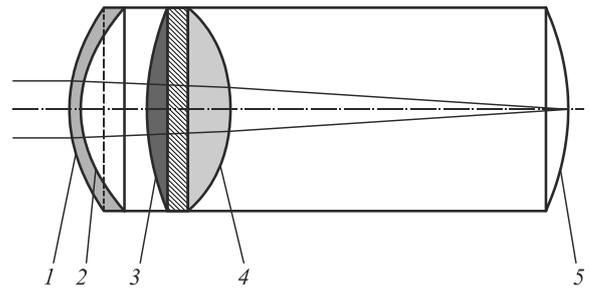


Рис. 10. Схема расположения основных преломляющих поверхностей глаза: 1 – передняя поверхность роговицы, 2 – задняя поверхность роговицы, 3 – передняя поверхность хрусталика, 4 – задняя поверхность хрусталика, 5 – сетчатка

К поверхности роговицы были последовательно добавлены различные aberrации. На рис. 11 представлено действие оптической системы с добавленной на переднюю поверхность роговицы комой, соответствующей функции Цернике (3, 1) с коэффициентом 1.

При задании радиуса нормировки для полиномов Цернике использовался не радиус линзы, а радиус выходного зрачка, рассчитанный Zemax, который составил 100 мм.

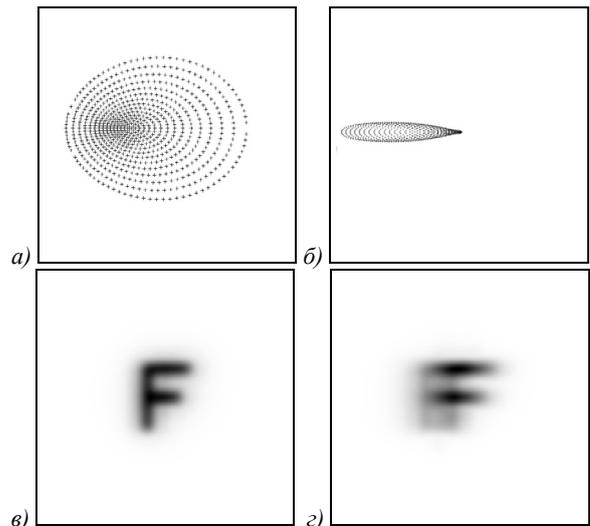


Рис. 11. ФРТ при отсутствии aberrации (а), при наличии комы (б) и соответствующие тестовые изображения (в, г)

В рамках данной работы также был произведен простейший статистический анализ на основе выборки из 150 измерений. У испытуемых (со здоровым хрусталиком) были независимо исследованы поверхности роговицы (передняя и задняя). Пациенты были объединены по возрастам (20–29 и 30–39 лет) и разделены по диагнозам (миопия слабой и средней степени).

Аберрометр WaveLight Oculyzer II позволяет получить значения коэффициентов Цернике отдельно для передней и задней поверхностей роговицы. Усредненные значения приведены на рис. 12–15. Для наглядной визуализации коэффициентов Цернике были исключены из рассмотрения (обнулены) коэффициенты, соответствующие функциям с номерами

( $n, 0$ ),  $n=0, 2, 4$ . Значения весовых коэффициентов этих функций на порядок выше всех остальных, но не несут информации о каких-либо отклонениях.

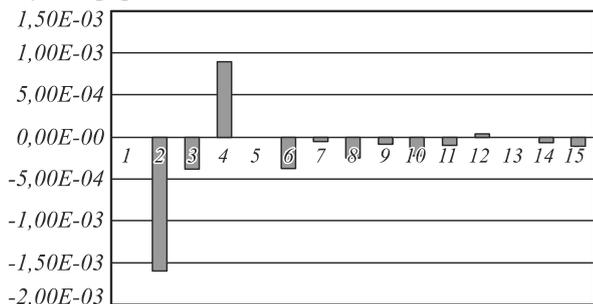


Рис. 12. Значения весовых коэффициентов полиномов Цернике для передней поверхности роговицы у здоровых людей

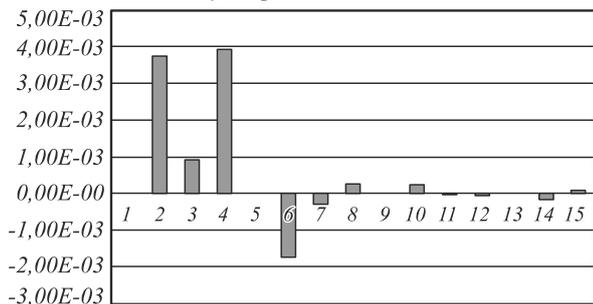


Рис. 13. Значения весовых коэффициентов полиномов Цернике для задней поверхности роговицы у здоровых людей

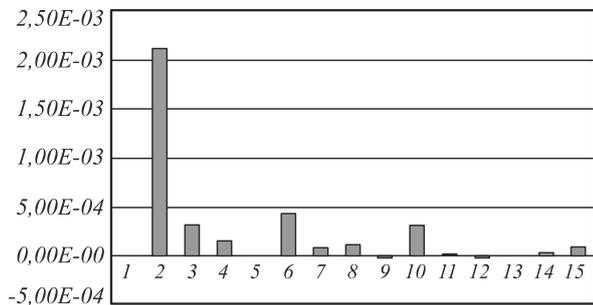


Рис. 14. Значения весовых коэффициентов полиномов Цернике для передней поверхности роговицы у людей с диагнозом миопия слабой степени

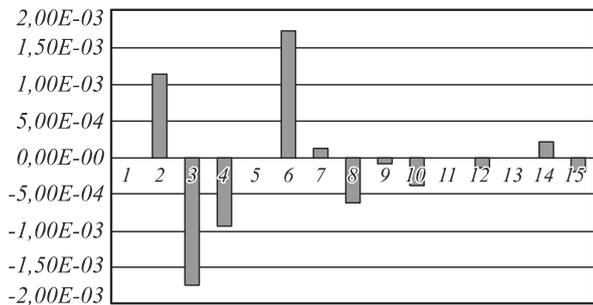


Рис. 15. Значения весовых коэффициентов полиномов Цернике для задней поверхности роговицы у людей с диагнозом миопия слабой степени

На рис. 16 показаны распределения, соответствующие усредненным аберрациям передней поверхности роговицы при диагнозе миопия слабой степени (SE от 1 до 5 диоптрий), а также соответствующая

ФРТ. Аналогичные распределения для задней поверхности роговицы показаны на рис. 17. Чтобы оценить влияние аберраций роговицы целиком, аберрации волнового фронта складывались, соответствующий результат показан на рис. 18.

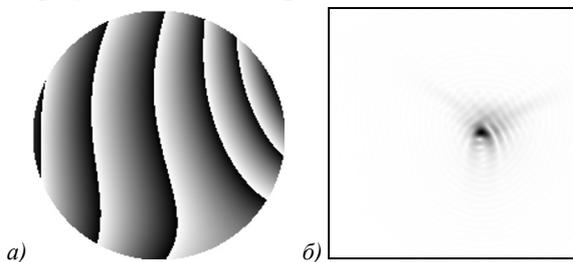


Рис. 16. Усреднённые аберрации передней поверхности роговицы при диагнозе миопия слабой степени: волновой фронт (а) и ФРТ (б)

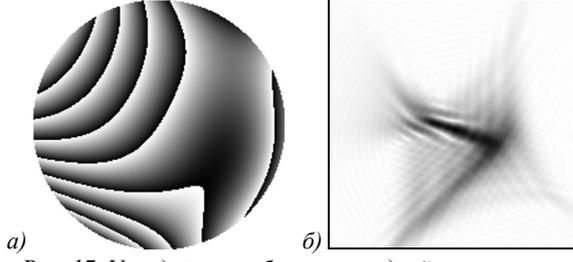


Рис. 17. Усреднённые аберрации задней поверхности роговицы при диагнозе миопия слабой степени: волновой фронт (а) и ФРТ (б)

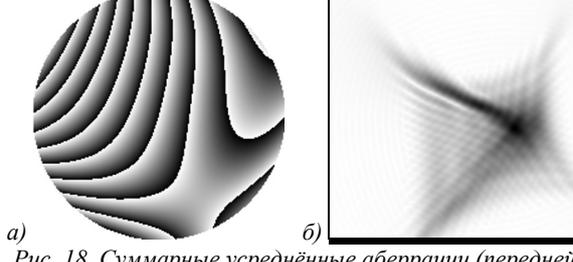


Рис. 18. Суммарные усреднённые аберрации (передней и задней поверхности) роговицы при диагнозе миопия слабой степени: волновой фронт (а) и ФРТ (б)

Аналогичным образом был получен результат для диагноза миопия средней степени (SE от 5 до 10 диоптрий, рис. 19).

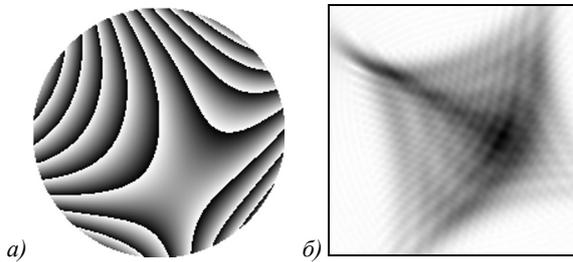


Рис. 19. Суммарные усреднённые аберрации (передней и задней поверхности) роговицы при диагнозе миопия средней степени: волновой фронт (а) и ФРТ (б)

По результатам статистического исследования было обнаружено соответствие наиболее ярко выраженных коэффициентов Цернике и диагноза, которое показано в табл. 2.

Стоит отметить, что в целом наблюдается небольшое увеличение средней сферической аберрации

со старением. Умеренное увеличение сферической аберрации связано с изменением асферичности роговицы со временем [19]. Передняя поверхность роговицы имеет тенденцию становиться менее вытянутой с возрастом, в то время как никаких существенных изменений задней поверхности роговицы при возрастных изменениях не наблюдается.

Табл. 2. Сводная таблица для передней и задней поверхности роговицы: соответствие диагноза и полиномов Цернике с наибольшими весовыми коэффициентами (обозначения соответствуют рис. 5, 8)

Передняя	
Миопия слабой степени	Миопия средней степени
<p>(1,-1); (2,2)</p>	<p>(1,-1); (1,1); (2,2); (3,3)</p>
Задняя	
Миопия слабой степени	Миопия средней степени
<p>(2,2); (1,1); (1,-1); (2,-2)</p>	<p>(2,2); (2,-2); (3,-1)</p>

**Заключение**

В рамках данной работы проведен анализ аберраций роговицы человеческого глаза на основе данных, полученных в глазной клинике Бранчевского осенью 2016 года. Анализ выполнен на основе представления аберраций в виде суперпозиции функций Цернике. В результате анализа (при котором были исключены из рассмотрения коэффициенты, соответствующие функциям с номерами  $(n, 0)$ ,  $n = 0, 2, 4$ ) выделены базисные функции Цернике, наиболее характерные для некоторых патологий глаза.

В частности, для выборки пациентов с миопией слабой степени обнаружено наличие наклона как на передней, так и на задней поверхности роговицы, но в большей степени зафиксирован астигматизм (особенно на задней поверхности). При миопии средней степени, как было обнаружено при анализе выборки, существенным становится влияние комы третьего порядка. При этом аберрации, свойственные слабой степени миопии, также сохраняются.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта РФФИ № 15-29-03823.

**Литература**

- Lombardo, M.** Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance / M. Lombardo, G. Lombardo // Journal of Cataract & Refractive Surgery. – 2010. – Vol. 36, Issue 2. – P. 313-331. – DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.09.026.
- Artal, P.** Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye / P. Artal, A. Guirao, E. Berrio, D.R. Williams // Journal of Vision. – 2001. – Vol. 1(1). – P. 1-8. – DOI: 10.1167/1.1.1.
- Artal, P.** Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age / P. Artal, E. Berrio, A. Guirao, P. Piers // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19(1). – P. 137-143. – DOI: 10.1364/JOSAA.19.000137.
- He, J.C.** Wavefront aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye / J.C. He, J. Gwiazda, F. Thorn, R. Held // Journal of the Optical Society of America A. – 2003. – Vol. 20(7). – P. 1155-1163. – DOI: 10.1364/JOSAA.20.001155.
- Mrochen, M.** Correlation between corneal and total wavefront aberrations in myopic eyes / M. Mrochen, M. Jankov, M. Bueeler, T. Seiler // Journal of Refractive Surgery. – 2003. – Vol. 19(2). – P. 104-112. – DOI: 10.3928/1081-597X-20030301-04.
- Kelly, J.E.** Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye / J.E. Kelly, T. Mihashi, H.C. Howland // Journal of Vision. – 2004. – Vol. 4. – P. 262-271. – DOI: 10.1167/4.4.2.
- Farah, S.G.** Laser in situ keratomileusis: literature review of a developing technique / S.G. Farah, D.T. Azar, C. Gurdal, J. Wong // Journal of Cataract & Refractive Surgery. – 1998. – Vol. 24(7). – P. 989-1006.
- Roberts, C.** Biomechanics of the Cornea and Wavefront-Guided Laser Refractive Surgery // Journal of Refractive Surgery. – 2002. – Vol. 18(5). – P. S589-S592.
- O’Keefe, M.** Corneal Surgical Approach in the Treatment of Presbyopia / M. O’Keefe, N. O’Keefe // Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology. – 2016. – Vol. 7(1). – P. 512. – DOI: 10.4172/2155-9570.1000512.
- Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973.
- Кирилловский, В.К.** Оптические измерения. Учебное пособие. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения / В.К. Кирилловский. – СПб.: СПб. ГИТМО (ТУ), 2003. – 60 с.
- HD Analyzer® User’s Manual.** – Visiometrics, 2012.
- Zemax® User’s Guide.** - Zemax Development Corporation, 2005.
- Khonina, S.N.** Diffractive optical element matched with Zernike basis / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, Ya. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – Vol. 11(2). – P. 442-445.
- Khonina, S.N.** Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, D.V. Kirsh // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 146-153.
- Kirilenko, M.S.** Wavefront analysis based on Zernike polynomials / M.S. Kirilenko, P.A. Khorin, A.P. Porfirev // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 66-75. - DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75.

17. **Porfirev, A.P.** Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
18. **Tocci, M.** How to Model the Human Eye in Zemax [Electronical Resource] / M. Tocci. – URL: <http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-model-the-human-eye-in-zemax>.
19. **Guirao, A.** Optical aberrations of the human cornea as a function of age / A. Guirao, M. Redondo, P. Artal // Journal of the Optical Society of America A. – 2000. – Vol. 17(10). – P. 1697-1702.

### Сведения об авторах

**Хорин Павел Алексеевич**, 1995 года рождения, в 2016 году окончил факультет информатики Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), магистр 1 курса факультета информатики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). Область научных интересов: компьютерная оптика, математическое моделирование, программирование. E-mail: [paul.95.de@gmail.com](mailto:paul.95.de@gmail.com).

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Карсаков Алексей Владиславович**, аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика. E-mail: [karsakov.aleksej@rambler.ru](mailto:karsakov.aleksej@rambler.ru).

**Бранчевский Сергей Львович**, кандидат медицинский наук, член Американского и Российского общества катарактальных и рефракционных хирургов, эксперт-офтальмолог Всемирной организации здравоохранения, генеральный директор глазной клиники Бранчевского, врач-офтальмолог высшей квалификационной категории. Область научных интересов: премиум-коррекция зрения, диагностика и хирургия катаракты, лазерная коррекция зрения. E-mail: [branchevski@glaza.ru](mailto:branchevski@glaza.ru).

ГРПТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 29 ноября 2016 г. Окончательный вариант – 6 декабря 2016 г.

## ANALYSIS OF CORNEAL ABERRATION OF THE HUMAN EYE

P.A. Khorin<sup>1</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>, A.V. Karsakov<sup>1</sup>, S.L. Branchevskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University, Samara, Russia,

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

<sup>3</sup> Branchevski’s Eye Clinic, Samara, Russia

### Abstract

In this work, we analyze the human eye corneal aberrations based on the data obtained in the Branchevski’s eye clinic. The analysis is performed on the basis of representation of aberrations as a superposition of Zernike functions. As the result of the analysis, we selected the Zernike basis functions which are the most characteristic for some pathologies of the eye.

**Keywords:** corneal aberration, Zernike function, point spread function, myopia of the human eye.

**Citation:** Khorin PA, Khonina SN, Karsakov AV, Branchevsky SL. Analysis of corneal aberrations of the human eye. Computer Optics 2016; 40(6): 810-817. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-810-817.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-29-03823).

### References

- [1] Lombardo M, Lombardo G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. Journal of Cataract & Refractive Surgery 2010; 36(2): 313-331. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.09.026.
- [2] Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR. Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye. J Vis 2001; 1(1): 1-8. DOI: 10.1167/1.1.1.
- [3] Artal P, Berrio E, Guirao A, Piers P. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. Journal of the Optical Society of America A 2002; 19(1): 137-143. DOI: 10.1364/JOSAA.19.000137.
- [4] He JC, Gwiazda J, Thorn F, Held R. Wave-front aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye. Journal of the Optical Society of America A 2003; 20(7): 1155-1163. DOI: 10.1364/JOSAA.20.001155.
- [5] Mrochen M, Jankov M, Bueeler M, Seiler T. Correlation between corneal and total wavefront aberrations in myopic

- eyes. *Journal of Refractive Surgery* 2003; 19(2): 104-112. DOI: 10.3928/1081-597X-20030301-04.
- [6] Kelly JE, Mihashi T, Howland HC. Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye. *Journal of Vision* 2004; 4(4): 262-271. DOI: 10.1167/4.4.2.
- [7] Farah SG, Azar DT, Gurdal C, Wong J. Laser in situ keratomileusis: literature review of a developing technique. *Journal of Cataract Refractive Surgery* 1998; 24(7): 989-1006.
- [8] Roberts C. Biomechanics of the Cornea and Wavefront-Guided Laser Refractive Surgery. *Journal of Refractive Surgery*. 2002; 18(5): S589-S592.
- [9] O’Keefe M, O’Keefe N. Corneal Surgical Approach in the Treatment of Presbyopia. *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology* 2016; 7(1): 512. DOI: 10.4172/2155-9570.1000512.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1999.
- [11] Kirilovskiy VK. Optical measures. Part II. The theory of sensitivity optical measuring levelling. The role of the optical image. Schoolbook [In Russian]. Saint-Petersburg: “SPb. GITMO (TU)” Publisher; 2003.
- [12] HD Analyzer® User’s Manual. Visiometrics; 2012.
- [13] Zemax® User’s Guide. Zemax Development Corporation; 2005.
- [14] Khonina SN, Kotlyar VV, Wang Ya. Diffractive optical element matched with Zernike basis. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2001; 11(2): 442-445.
- [15] Khonina SN, Kotlyar VV, Kirsh DV. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering* 2015; 1(2): 146-153.
- [16] Kirilenko MS, Khorin PA, Porfirev AP. Wavefront analysis based on Zernike polynomials. *CEUR Workshop Proceedings* 2016; 1638: 66-75. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75.
- [17] Porfirev AP, Khonina SN. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions. *Proc SPIE* 2016; 9807: 98070E. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [18] Tocci M. How to Model the Human Eye in Zemax. Source: <http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-model-the-human-eye-in-zemax>.
- [19] Guirao A, Redondo M, Artal P. Optical aberrations of the human cornea as a function of age. *J Opt Soc Am A* 2000; 17(10): 1697-1702.

#### Authors' Information

**Pavel Alexeyevich Khorin**, was born in 1995, in 2016 he graduated from Informatics Faculty of Samara State Aerospace University (National Research University), Master of 1 course of Computer Science faculty of Samara National Research University. Research interests: computer optics, mathematical modeling, programming. E-mail: [paul.95.de@gmail.com](mailto:paul.95.de@gmail.com).

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Alexey Vladislavovich Karsakov**, a graduate student of National Research University. Research interests: diffractive optics. E-mail: [karsakov.aleksejj@rambler.ru](mailto:karsakov.aleksejj@rambler.ru).

**Sergei Lvovich Branchevski**, a candidate of Medical Sciences, member of the American and Russian Society of Cataract and Refractive Surgery, an expert ophthalmologist of the World Health Organization, CEO Branchevski’s Eye Clinic, an ophthalmologist of the highest qualification the category-theory. Research interests: the premium vision correction, diagnostics and cataract surgery, laser vision correction. E-mail: [branchevski@glaza.ru](mailto:branchevski@glaza.ru).

*Received November 29, 2016. The final version – December 6, 2016.*