



Авдеев И.А. ✉, Макарчук К.В.

ООО «Центр микрохирургии глаза Макарчука», Брест, Беларусь

Анализ зависимости основных аберраций высоких порядков роговицы от возраста у пациентов перед хирургией катаракты

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: концепция и дизайн исследования, редактирование, сбор материала, обработка, написание текста – Авдеев И.А., Макарчук К.В.

Благодарности: руководству ООО «Центр микрохирургии глаза Макарчука» в лице директора Макарчука К.В. за предоставление пространства и оборудования для проведения исследования и контроль.

Подана: 04.11.2025

Принята: 02.02.2026

Контакты: ilik.90@mail.ru

Резюме

Цель. Оценка наличия зависимости аберраций высоких порядков роговицы от возраста пациента и поиск возможных возрастных ограничений для имплантации мультифокальной ИОЛ для использования в практике без непосредственной аберрометрии.

Материалы и методы. В исследование было включено 103 пациента, обратившихся в медицинский центр для хирургического лечения. Данным пациентам проводилось стандартное предоперационное офтальмологическое обследование. Биометрия глаза выполнялась на кератотопографе Pentacam AXL wave. Оценивались основные аберрации высоких порядков роговицы (кома, трилистник и сферическая аберрация, RMS HOA) по протоколу анализа Цернике в 6- и 4-миллиметровой зоне роговицы.

Результаты. Наименьший вклад в структуру общих негативных оптических эффектов вносит аберрация «косой трилистник» (полином Z33), а сферические аберрации (полином Z40) оказывают наибольшее влияние на выраженность суммарных аберраций роговицы. Также стоит отметить влияние аберрации «вертикальная кома» (полином Z3-1) на общую картину аберраций роговицы из-за значительной вариабельности значений. В возрастных группах от 40 до 45 лет и от 46 до 50 лет отмечались самые низкие показатели аберраций высоких порядков, выявлено значительное увеличение значений АВП с 71 года, определена тенденция увеличения весовых коэффициентов полинома Z40 и показателя RMS HOA с увеличением возраста пациентов. Выявлена положительная корреляционная связь средней силы для значений полинома Z40 и показателя RMS HOA с возрастом пациентов.

Заключение. Пациенты в возрасте от 40 до 50 лет являются наиболее предпочтительными кандидатами для имплантации мультифокальных интраокулярных линз, пациентам в возрасте от 51 года до 70 лет требуется оценка показателей аберраций высоких порядков, имплантация мультифокальных интраокулярных линз пациентам старше 71 года нежелательна, отмечается возможность усиления выраженности или появления негативных оптических эффектов у пациентов старше 71 года с мультифокальной ИОЛ.



Ключевые слова: aberrации роговицы, кома, трилистник, сферическая aberrация, RMS HOA, полиномы Цернике, мультифокальная ИОЛ

Avdeev I. ✉, Makarchuk K.

Makarchuk Eye Microsurgery Center, Brest, Belarus

Analysis of Major High-Order Corneal Aberrations as a Function of Age in Patients Before Cataract Surgery

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contributions: study concept and design, editing, data collection, processing, and writing – Avdeev I., Makarchuk K.

Acknowledgements: to the management of Makarchuk Eye Microsurgery Center, LLC, represented by Director Makarchuk K., for providing the space and equipment for the study and for overseeing it.

Submitted: 04.11.2025

Accepted: 02.02.2026

Contacts: ilik.90@mail.ru

Abstract

Purpose. To evaluate the relationship between high-order corneal aberrations and patient age and to identify potential age restrictions for multifocal IOL implantation for practical use without direct aberrometry.

Materials and methods. The study included 103 patients who presented to a medical center for surgical treatment. These patients underwent a standard preoperative ophthalmological examination. Ocular biometry was performed using a Pentacam AXL Wave corneal topographer. The main high-order corneal aberrations (coma, trefoil, and spherical aberration, RMS HOA) were assessed using the Zernike analysis protocol in 6- and 4-mm corneal zones.

Results. The oblique trefoil aberration (Z33 polynomial) makes the smallest contribution to the overall negative optical effects, while spherical aberrations (Z40 polynomial) have the greatest impact on the severity of total corneal aberrations. The influence of the vertical coma aberration (Z3-1 polynomial) on the overall corneal aberration pattern is also noteworthy due to its significant variability. The 40- to 45-year-old and 46- to 50-year-old age groups demonstrated the lowest values of high-order aberrations, a significant increase in AVP values from age 71, and a trend toward increasing weighting factors for the Z40 polynomial and the RMS HOA index with increasing patient age. A positive correlation of moderate strength was found between the Z40 polynomial and the RMS HOA index and patient age.

Conclusion. Patients aged 40 to 50 years are the most preferred candidates for multifocal intraocular lens implantation. Patients aged 51 to 70 years require evaluation of high-order aberrations. Implantation of multifocal intraocular lenses in patients over 71 years of age is not recommended. There is a potential for increased severity or occurrence of negative optical effects in patients over 71 years of age with a multifocal IOL.

Keywords: corneal aberrations, coma, trefoil, spherical aberration, RMS HOA, Zernike polynomials, multifocal IOL

■ ВВЕДЕНИЕ

На формирование изображения на сетчатке глаза влияют aberrации волнового фронта. Волновой фронт – это концептуальная поверхность в пространстве, которая соединяет все световые лучи, выходящие из источника света, с одной и той же временной фазой и одинаковой длиной оптического пути, а также разделяет возмущенный и не возмущенный колебаниями участок упругой среды. При прохождении волнового фронта через реальную линзу, имеющую микродефекты преломляющих поверхностей, возникают aberrации волнового фронта. Эти aberrации делятся на aberrации низших порядков (LOA) и высших порядков (HOA). Aberrациями низших порядков являются: 1-й порядок – наклон (Tilt) – наклон лучей света относительно вертикальной или горизонтальной оси, 2-й порядок – дефокус (миопия, гиперметропия) и астигматизм. Данные aberrации составляют 90% всех волновых aberrаций. К представителям aberrаций высоких порядков (от 3 до 10) относятся кома, трилистник, сферическая aberrация, астигматизм четвертого порядка, четырехлистник и другие. На эти aberrации приходится лишь 10% всех волновых aberrаций оптической системы глаза. Из aberrаций высоких порядков, оказывающих наибольший эффект искажений изображения на сетчатке глаза, можно выделить кому, трилистник и сферическую aberrацию. Также стоит отметить наличие корреляции aberrаций между правым и левым глазом пациента.

Кома обусловлена тем, что лучи света, приходящие под углом к оптической оси, не собираются в одной точке при прохождении преломляющих поверхностей. При этом изображения могут иметь «хвост», похожий на комету. Кома 3-го порядка может быть вертикальной и горизонтальной. Трилистник – это оптическая aberrация, возникающая при нерегулярности поверхности оптических элементов глаза на их периферии и образующая различное линейное оптическое увеличение на разных участках изображения. Трилистник вызывает негативные оптические эффекты в виде бликов или ореола и может быть косым или вертикальным. Сферическая aberrация – это различие в преломлении лучей света между центральной и периферической частями линзы, в результате этого фокусы лучей не совпадают. Это приводит к снижению четкости границ объектов и формированию ореолов вокруг источника света. Сферическая aberrация может быть положительная, когда периферическая часть линзы преломляет сильнее центра, и отрицательная, при которой центр линзы преломляет лучи света сильнее периферии. В оптической системе глаза в подавляющем большинстве преобладает положительная сферическая aberrация. В противовес этому интраокулярные линзы с асферическим дизайном обладают отрицательной сферической aberrацией, которая призвана частично нивелировать сферические aberrации оптической системы глаза и улучшить качество зрения пациента. Но дизайн мультифокальных линз при их имплантации приводит к увеличению aberrаций волнового фронта, благодаря этому и реализуется эффект мультифокальности.

Основным источником aberrаций в оптической системе глаза являются передняя и задняя поверхности роговицы. Поэтому заболевания роговицы, последствия травм, индивидуальные особенности строения роговицы могут приводить к значительному уровню aberrаций высоких порядков, которые сложно компенсировать. Они могут быть частично нивелированы величиной зрачка и хрусталиком. При исходно высоком значении aberrаций или их пограничном значении в случае имплантации мультифокальных линз суммарные aberrации оптической системы



глаза становятся настолько значимыми, что влияют на качество зрения пациента и его удовлетворенность результатами хирургического лечения катаракты. Исходя из этого, во время предоперационного обследования пациента, претендующего на имплантацию мультифокальных линз, необходимо оценивать уровень аберраций высоких порядков роговицы. Современные диагностические системы позволяют количественно определить данные параметры и заранее спрогнозировать выраженность негативных оптических эффектов после имплантации премиальных мультифокальных линз.

Математическим отражением ошибок волнового фронта при преломлении света роговицей является протокол анализа Цернике. Данные схематически представляются в виде пирамиды. Аберрации в центре этой схемы оказывают наибольшее влияние на качество зрительного восприятия в сравнении с аберрациями на ее периферии. Каждой аберрации соответствует полином Цернике, то есть математическая функция, описывающая эту аберрацию. Каждый полином имеет кодировку, в которой буква Z означает полином Цернике, первая цифра – порядок аберрации, вторая цифра – угловую частоту и частоту повтора. Для каждого полинома рассчитывается весовой коэффициент, отражающий вклад в общую аберрацию и выраженность отклонения от идеального волнового фронта. Также рассчитываются усредненные показатели для групп аберраций, например, RMS HOA – среднеквадратичное отклонение аберраций высоких порядков. На основании величин весовых коэффициентов и показателя RMS можно судить о выраженности аберраций роговицы.

Но такое оборудование есть в доступности не у каждого врача-офтальмолога, к которому обращаются пациенты по поводу хирургии катаракты. В связи с этим возникает необходимость выявления ограничений для имплантации мультифокальных ИОЛ, в том числе и при невозможности непосредственной оценки аберраций.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка наличия зависимости аберраций высоких порядков от возраста пациента и поиск возможных возрастных ограничений для имплантации мультифокальной ИОЛ для использования в практике без непосредственной аберрометрии.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование было включено 103 пациента, обратившихся в медицинский центр для хирургического лечения катаракты с 2024 по 2025 год, за исключением пациентов с вторичными изменениями роговицы (последствия травм, перенесенных воспалительных заболеваний и операций). Возрастной диапазон пациентов составил от 40 до 90 лет. Средний возраст – 61,58 года, мода – 47 лет, медиана – 61 год. Исследованию подлежал глаз, на котором планировалась операция фактоэмульсификации катаракты с имплантацией ИОЛ.

Данным пациентам проводилось стандартное предоперационное офтальмологическое обследование, включающее визометрию, авторефрактометрию, тонометрию, биомикроскопию переднего отрезка глаза, гониоскопию, УЗИ глазного яблока с определением ПЗО, биомикроофтальмоскопию при достаточной прозрачности оптических сред, осмотр с трехзеркальной линзой при достаточной прозрачности оптических сред. Биометрия глаза выполнялась на кератотопографе Oculus Pentacam AXL wave. Оценивались основные аберрации высоких порядков роговицы (кома

(z31, z3-1), трилистник (z33, z3-3) и сферическая аберрация (z40), показатель RMS HOA по протоколу анализа Цернике в 6-миллиметровой зоне роговицы, а также RMS HOA в 4-миллиметровой зоне).

Все пациенты были разделены на 10 групп по возрасту с интервалом в 5 лет. Статистическая обработка результатов была проведена с помощью программ Microsoft Office Excel и Statistica 10. Для каждой группы была рассчитана медиана абсолютных значений весовых коэффициентов, указанных выше полиномов Цернике и RMS HOA. Также был произведен расчет медианы, минимального и максимального абсолютного значения для каждого исследуемого полинома Цернике и RMS HOA в общей выборке (103 пациента указанных возрастов). Определен характер распределения всех исследуемых величин. Проведен сравнительный анализ статистической достоверности разности аберраций высоких порядков у пациентов в возрасте до 70 лет включительно и 71 год и старше, рассчитан коэффициент корреляции весовых коэффициентов исследуемых полиномов Цернике и возраста пациентов.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно был проведен анализ характера распределения значений весовых коэффициентов полиномов Цернике и показателя RMS HOA с помощью критериев Шапиро – Уилка и Колмогорова – Смирнова. Результаты данного анализа приведены в табл. 1.

По результатам анализа выявлено, что значения уровней значимости критерия Шапиро – Уилка меньше критического уровня, равного 0,05, для полиномов Z3-3, Z31, Z40, а также показателей RMS HOA в 4- и 6-миллиметровой зоне роговицы. Для полиномов Z3-1 и Z33 уровень значимости критерия Шапиро – Уилка был определен выше критического. Также уровни значимости критерия Колмогорова – Смирнова для полиномов Z3-1, Z31, Z33 были выше указанных в таблице критических значений, для остальных исследуемых показателей они были ниже. Исходя из данных таблицы характер распределения весовых коэффициентов полиномов Z3-3, Z31, Z40, а также показателей RMS HOA в 4- и 6-миллиметровой зоне роговицы является отличным от нормального, а для полиномов Z3-1 и Z33 соответствует нормальному

Таблица 1
Значения критериев Шапиро – Уилка (W) и Колмогорова – Смирнова (d) и уровня значимости (p) для весовых коэффициентов и RMS HOA в возрастной группе от 40 до 90 лет
Table 1
Value of the Shapiro – Wilk (W) and Kolmogorov – Smirnov (d) criteria and the significance level (p) for weighting coefficients and RMS HOA in the age group from 40 to 90 years

Полином Цернике / RMS	Критерий Шапиро – Уилка		Критерий Колмогорова – Смирнова	
	W	p	d	p
Z3-3	0,886	0,000	0,119	<0,15
Z3-1	0,976	0,053	0,066	>0,2
Z31	0,965	0,007	0,064	>0,2
Z33	0,983	0,226	0,057	>0,2
Z40	0,955	0,002	0,118	<0,15
RMS HOA 6 мм	0,832	0,000	0,182	<0,01
RMS HOA 4 мм	0,806	0,000	0,181	<0,01



распределению. В связи с этим будут применяться непараметрические критерии для последующего анализа, также для полиномов с нормальным распределением результаты будут проверены с помощью параметрических критериев.

Так как на выраженность негативных оптических эффектов влияет отклонение значения весового коэффициента от нулевого вне зависимости от направления, то для анализа выраженности и динамики аберраций высоких порядков будут учитываться абсолютные значения весовых коэффициентов без учета знаков.

По результатам проведенного исследования получены значения медиан, минимальные и максимальные значения, амплитуда абсолютных значений полиномов Цернике и RMS HOA для пациентов в возрасте от 40 до 90 лет в 6-миллиметровой зоне роговицы, а также RMS HOA в 4-миллиметровой зоне. Они представлены в табл. 2.

По данным табл. 2 видно, что наименьшее значение медианы имеет полином Z33, полиномы Z31, Z3-1, Z3-3 имеют промежуточное значение медианы абсолютных значений весовых коэффициентов, а полином Z40 отличается наибольшим значением медианы. Максимальное абсолютное значение весового коэффициента характерно для полинома Z3-1, а минимальное значение для полинома Z3-3. Наибольшая вариабельность значений характерна для полинома Z3-1. Приведенные данные свидетельствуют о том, что наименьший вклад в структуру общих негативных оптических эффектов вносит аберрация «косой трилистник» (полином Z33), а сферические аберрации (полином Z40) оказывают наибольшее влияние на выраженность суммарных аберраций роговицы. Также стоит отметить влияние аберрации «вертикальная кома» (полином Z3-1) на общую картину аберраций роговицы из-за значительной вариабельности значений весового коэффициента.

При анализе выраженности аберраций в возрастных группах получены следующие результаты абсолютных значений медиан: в возрастной группе от 40 до 45 лет наибольшими значениями характеризуются полиномы Z3-1 (0,231 мкм) и Z40 (0,202 мкм), полиномом с наименьшим значением является Z33 (0,048 мкм); в возрастной группе от 46 до 50 лет наибольшим значением обладает полином Z40 (0,247 мкм), а наименьшим значением полином Z33 (0,059 мкм); в возрастной группе от 51 года до 55 лет с наибольшим значением определен полином Z3-1 (0,248 мкм), а с наименьшим значением – полином Z31 (0,063 мкм); в возрастной группе от 56 до 60 лет полиномы Z3-1 и Z40 являются наиболее значимыми (0,265 мкм и 0,256 мкм соответственно), наименьшим значением обладает полином Z31 (0,097 мкм); в возрастной группе от 61 года до 65 лет наибольшим значением обладает полином Z40 (0,261

Таблица 2
Критерии разнообразия полиномов Цернике и RMS HOA роговицы пациентов в возрасте от 40 до 90 лет

Table 2
Diversity criteria of Zernike polynomials and RMS HOA of cornea of patients aged 40 to 90 years

	Z31	Z3-1	Z33	Z3-3	Z40	RMS 6 мм	RMS 4 мм
Медиана	0,122	0,173	0,094	0,114	0,276	0,5	0,141
Макс.	0,698	1,07	0,531	1,036	0,725	1,525	0,583
Мин.	0,004	0,012	0,002	0	0,024	0,285	0,063
Амплитуда	0,694	1,058	0,529	1,036	0,701	1,24	0,52

мкм), полином Z33 – наименьшим значением, равным 0,116 мкм; в группе от 66 до 70 лет наибольшее значение имеет полином Z40 (0,293 мкм), а наименьшее – полином Z33 (0,07 мкм); в возрастной группе от 71 года до 75 лет отмечается наибольшее значение полинома Z40 (0,379 мкм), а наименьшее значение у полинома Z3-3 (0,08 мкм); в группе пациентов от 76 до 80 лет наибольшее значение имеет полином Z40 (0,382 мкм), наименьшее значение у полинома Z31 (0,175); в группе пациентов от 81 года до 85 лет наибольшим значением обладают полиномы Z40 (0,384 мкм) и Z3-1 (0,366 мкм), наименьшим значением – полином Z31 (0,144 мкм); в возрастной группе от 86 до 90 лет наиболее значимым полиномом является Z40 (0,493 мкм), а наименьшим Z33 (0,117 мкм). Все рассчитанные значения медиан полиномов Цернике, а также показатель RMS HOA в возрастных группах представлены в табл. 3.

Для различных возрастных групп сохраняется тенденция, характерная для всей выборки (103 пациента): наиболее выраженными являются сферическая аберрация и вертикальная кома, а аберрацией с меньшим значением является косой трилистник.

При анализе полученных данных значений медиан исследуемых полиномов Цернике оценивалась их динамика соответственно возрасту.

Полином Z31 имел наименьшее значение в возрастной группе 40–45 лет (0,049 мкм), а наибольшее в группе 76–80 лет (0,175 мкм), в остальных возрастных группах значения данного полинома были близки к значению медианы в исследуемой выборке и не имели заметной зависимости от возраста.

Полином Z3-1 имел наименьшее значение в возрасте 66–70 лет (0,101 мкм), наибольшим значением характеризовался в возрастной группе 81–85 лет (0,366 мкм). Величины данного полинома в группах отличались значительным разбросом от величины медианы без заметной зависимости от возраста.

Полином Z33 имел наименьшее значение в возрастной группе 40–45 лет (0,048 мкм), а наибольшее значение имел в группе 76–80 лет (0,246 мкм). Гистограмма, характеризующая распределение значений медиан полинома Z33 в возрастных группах, приведена на рис. 1.

Таблица 3
Медианы полиномов Цернике и RMS HOA роговицы в возрастных группах пациентов
Table 3
Medians of Zernike polynomials and RMS of corneal HOA in age groups of patients

Возраст	Z31, мкм	Z3-1, мкм	Z33, мкм	Z3-3, мкм	Z40, мкм	RMS HOA 6 мм, мкм	RMS HOA 4 мм, мкм
40–45	0,049	0,231	0,048	0,074	0,202	0,423	0,115
46–50	0,123	0,118	0,059	0,098	0,247	0,391	0,108
51–55	0,063	0,248	0,079	0,115	0,236	0,506	0,136
56–60	0,097	0,265	0,130	0,097	0,256	0,503	0,155
61–65	0,147	0,170	0,116	0,129	0,261	0,507	0,164
66–70	0,101	0,101	0,139	0,071	0,293	0,5275	0,146
71–75	0,142	0,152	0,151	0,080	0,379	0,597	0,154
76–80	0,175	0,241	0,246	0,237	0,382	0,709	0,185
81–85	0,144	0,366	0,194	0,159	0,384	0,794	0,266
86–90	0,138	0,129	0,117	0,221	0,493	0,829	0,231

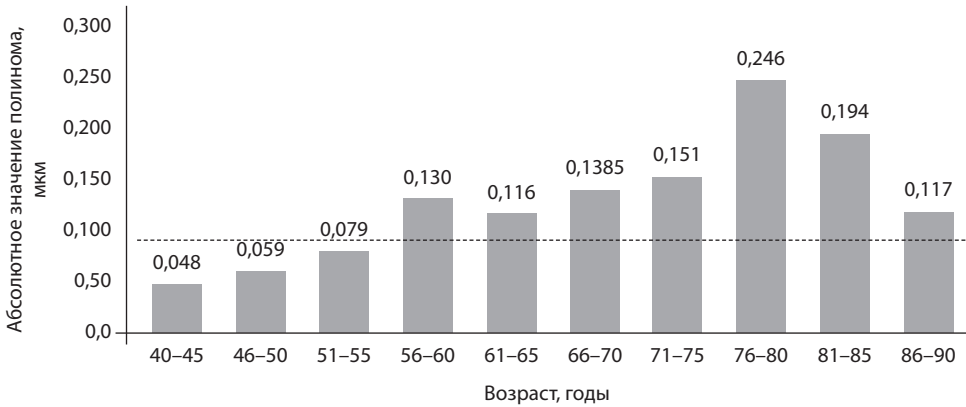


Рис. 1. Значения медиан полинома Z33 в возрастных группах (линией обозначено значение медианы данного полинома для всей выборки)

Fig. 1. Median values of the Z33 polynomial in age groups (the line indicates the median value of this polynomial for the entire sample)

При анализе гистограммы отмечается зависимость значения медианы данного полинома от возраста пациентов.

Полином Z3-3 имеет наименьшее значение в возрасте 40–45 лет (0,074 мкм), наибольшее значение в возрасте 76–80 лет (0,237 мкм). Гистограмма, характеризующая распределение значений медиан полинома Z3-3 в возрастных группах, приведена на рис. 2.

Отмечается существенное увеличение значений данного полинома с 76 лет. Средние величины полинома Z3-3 в возрасте от 76 до 90 лет были больше средней величины этого полинома для всей выборки (0,114 мкм).

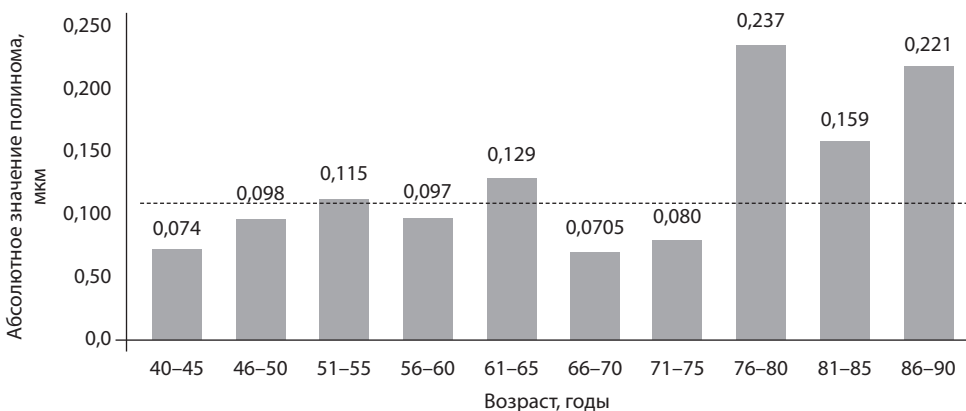


Рис. 2. Значения медиан полинома Z3-3 в возрастных группах (линией обозначено значение медианы данного полинома для всей выборки)

Fig. 2. Values of the medians of the Z3-3 polynomial in age groups (the line indicates the value of the median of this polynomial for the entire sample)

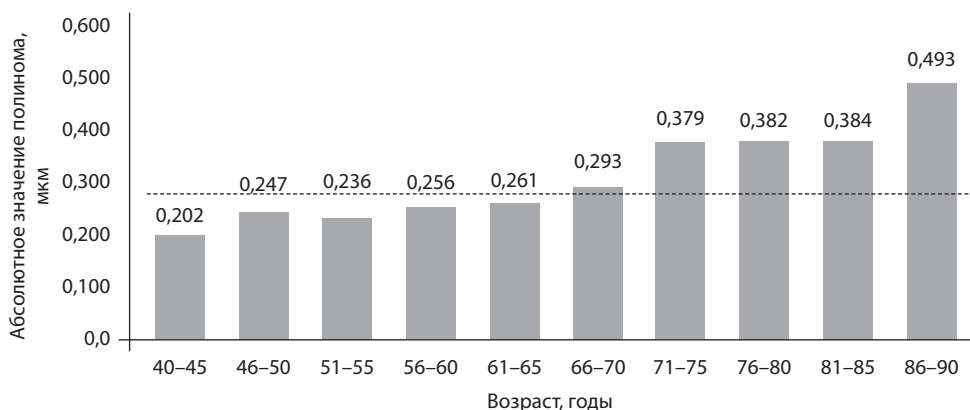


Рис. 3. Значения медиан полинома Z40 в возрастных группах (линией обозначено значение медианы данного полинома для всей выборки)

Fig. 3. Median values of the Z40 polynomial in age groups (the line indicates the median value of this polynomial for the entire sample)

Полином Z40 характеризуется наименьшим значением в возрастных группах 40–45 лет и 51–55 лет (0,202 мкм и 0,236 мкм соответственно), а самое большое значение имеет в возрасте 86–90 лет (0,493 мкм). Гистограмма, характеризующая распределение значений медиан полинома Z40 в возрастных группах, приведена на рис. 3.

При анализе данных гистограммы стоит отметить увеличение значений медиан полинома Z40 в зависимости от возраста пациента. Также выявляется существенное превышение медианы данного полинома в возрасте от 71 года до 90 лет относительно среднего значения для всей выборки (0,276 мкм).

Наименьшее значение среднеквадратичного отклонения аберраций высоких порядков (RMS HOA) в 6-мм зоне роговицы определялось в возрастных группах

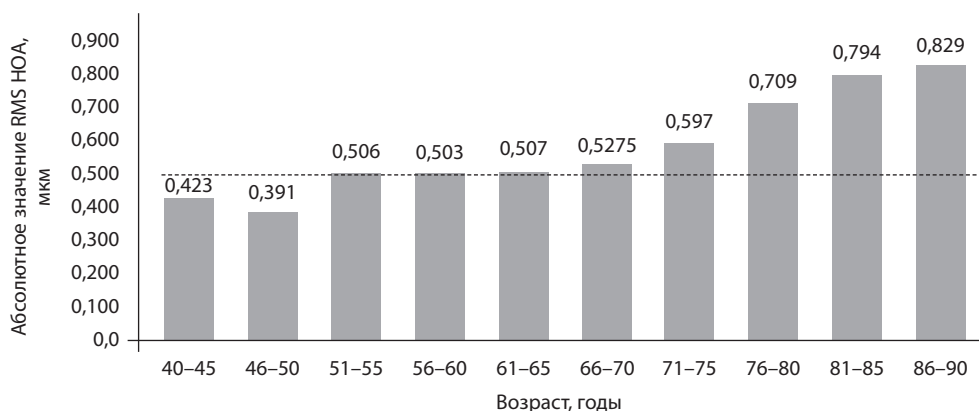


Рис. 4. Значения медиан RMS HOA в 6-миллиметровой зоне роговицы в возрастных группах (линией обозначено среднее значение RMS HOA для всей выборки)

Fig. 4. Median RMS HOA values in the 6-mm corneal zone in age groups (the line indicates the average RMS HOA value for the entire sample)



40–45 лет и 46–50 лет (0,423 мкм и 0,391 мкм соответственно). Наибольший показатель RMS HOA выявлен в возрастной группе 86–90 лет (0,829 мкм). Гистограмма, характеризующая распределение значений медиан RMS HOA в возрастных группах, приведена на рис. 4.

При анализе гистограммы прослеживается увеличение значений медиан RMS HOA в зависимости от возраста, отмечается существенное превышение данного показателя относительно величины медианы RMS HOA (0,5 мкм) для всей выборки в возрастных группах от 71 года до 90 лет.

Наименьшее значение среднеквадратичного отклонения аберраций высоких порядков (RMS HOA) в 4-мм зоне роговицы определялось в возрастных группах 40–45 лет и 46–50 лет (0,115 мкм и 0,108 мкм соответственно). Наибольший показатель RMS HOA выявлен в возрастной группе 81–85 лет (0,266 мкм). Гистограмма, характеризующая распределение значений медиан RMS HOA в возрастных группах, приведена на рис. 5.

По данным, представленным на рис. 5, отмечается постепенное увеличение значений медиан RMS HOA в возрастных группах пациентов со значительным увеличением с 76-летнего возраста и существенным превышением в этом возрастном периоде значения медианы для всей выборки. Но также стоит отметить, что даже самое высокое значение этого показателя было меньше 0,3 мкм, при превышении которого имплантация мультифокальных линз не рекомендуется.

По результатам анализа динамики значений медиан полиномов Цернике и среднеквадратичного отклонения аберраций высоких порядков выявлено их существенное увеличение у пациентов 71 года и старше. Пациенты возрастных групп 40–45 лет и 46–50 лет характеризуются самыми низкими показателями аберраций высоких порядков. У пациентов в возрасте от 50 до 70 лет значения весовых коэффициентов аберраций высоких порядков распределены вблизи медианы, рассчитанной для всей выборки. Отмечается наличие зависимости значений полиномов Z33, Z3-3, Z40 и RMS HOA от возраста пациентов по данным гистограмм.

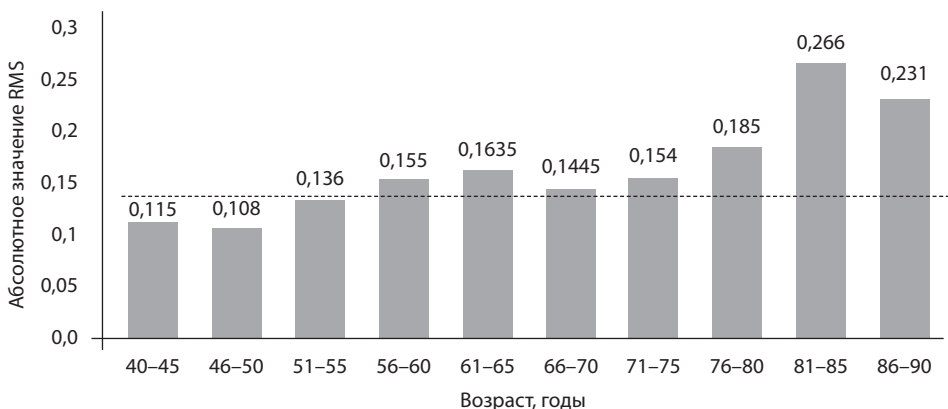


Рис. 5. Значения медиан RMS HOA в 4-миллиметровой зоне роговицы в возрастных группах (линией обозначено среднее значение RMS HOA для всей выборки)

Fig. 5. Median RMS HOA values in the 4-mm corneal zone in age groups (the line indicates the average RMS HOA value for the entire sample)

Исходя из тенденций изменения показателей исследуемых полиномов Цернике в возрастных группах, вся выборка была разделена на 2 группы. В состав первой группы вошли пациенты в возрасте от 40 до 70 лет, а во вторую группу определены пациенты в возрасте от 71 года до 90 лет. Для каждого из исследуемых полиномов и показателя среднеквадратичного отклонения aberrаций высоких порядков роговицы был проведен анализ достоверности различия их значений медиан в двух сравниваемых группах пациентов с помощью критерия Манна – Уитни в программе Statistica 10. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Рассчитанные показатели сравнивались с уровнем значимости, равным 0,05. Значения функции для полиномов Z31, Z3-1, Z3-3, Z33 оказались выше данного уровня значимости. Это свидетельствует о том, что для значений медиан весовых коэффициентов данных полиномов в двух группах нет статистически значимого различия. Но для полинома Z40 и показателя RMS HOA значения уровня значимости были существенно ниже критического. Исходя из этого можно заключить, что весовые коэффициенты данного полинома и RMS HOA в двух исследуемых возрастных группах (до 70 лет включительно и после 71 года) статистически значимо различаются. Полученные результаты данного анализа для полиномов Z3-1 и Z33 были проверены с помощью параметрического критерия Стьюдента. В итоге проведенной проверки значения Т-критерия были меньше критического, равного 1,96 (для полинома Z3-1 Т-критерий был равен 0,587, для полинома Z33 Т-критерий был равен 0,09) при уровне значимости $\alpha=0,05$ (уровень значимости для полинома Z3-1 – 0,559, для полинома Z33 – 0,93), что подтверждает результаты, полученные при использовании непараметрических методов.

Таким образом, с помощью статистических методов была подтверждена разница для трех из семи исследуемых показателей (Z40, RMS HOA в 6-миллиметровой зоне, RMS HOA в 4-миллиметровой зоне роговицы), остальные показатели не имеют статистически значимых различий весовых коэффициентов до и после 71 года.

При анализе возрастных групп была выявлена зависимость выраженности некоторых из исследуемых показателей от возраста пациента. Для статистического подтверждения корреляционной связи между весовыми коэффициентами полиномов Цернике, среднеквадратичного отклонения aberrаций высоких порядков роговицы

Таблица 4
Показатели U-критерия Манна – Уитни и уровня значимости для полиномов Цернике и среднеквадратичного отклонения aberrаций высоких порядков
Table 4
Mann – Whitney U-test and significance level values for Zernike polynomials and the standard deviation of high-order aberrations

Полином Цернике / RMS	Значение U-критерия	Уровень значимости, p
Z3-3	729,0	0,058965
Z3-1	916,5	0,655486
Z31	945,5	0,823476
Z33	927,5	0,717697
Z40	407,5	0,000013
RMS HOA 6 мм	380,5	0,000005
RMS HOA 4 мм	476,0	0,000126

Таблица 5
Значения коэффициентов корреляции Спирмена и тау корреляции Кендалла, а также уровни их значимости для исследуемых полиномов Цернике и показателя RMS HOA
Table 5
The values of the Spearman correlation coefficient and Kendall's tau correlation coefficient, as well as their significance levels for the studied Zernike polynomials and the RMS HOA indicator

Полином Цернике / RMS	Ранговая корреляция Спирмена			Тау корреляция Кендалла	
	Значение R	t(N-2)	Уровень значимости p	Значение тау	Уровень значимости
Z3-3	-0,149	-1,512	0,134	-0,01	0,136
Z3-1	0,061	0,615	0,540	0,044	0,507
Z31	0,038	0,380	0,705	0,024	0,725
Z3-3	0,015	0,148	0,883	0,031	0,642
Z40	0,520	6,123	0,000	0,381	0,000
RMS HOA 6 мм	0,539	6,427	0,000	0,375	0,000
RMS HOA 4 мм	0,532	6,307	0,000	0,374	0,000

и возрастом пациента, установления направления связи, измерения силы корреляционной связи был проведен корреляционный анализ с помощью критерия ранговой корреляции Спирмена и тау корреляции Кендалла. Полученные результаты коэффициента корреляции приведены в табл. 5.

Уровень значимости ранговой корреляции Спирмена и тау корреляции Кендалла для полиномов Z31, Z3-1, Z3-3, Z33 оказался выше критического уровня, равного 0,05. Это свидетельствует об отсутствии корреляционной связи между значениями данных показателей и возрастом пациента. Полученный результат для полиномов Z3-1 и Z33 был проверен с помощью параметрического критерия Пирсона: для полинома Z3-1 $r=0,016$ и уровень значимости $p=0,873$, для полинома Z33 $r=-0,027$ и уровень значимости $p=0,98$, что подтверждает результаты непараметрического анализа. Но для полинома Z40, показателя RMS HOA указанные выше уровни значимости были выше критического значения, а значение $t(N-2)$, определяющее статистическую значимость коэффициента, выше значения критерия Стьюдента, равного 1,96 для выборок больше 30 с уровнем значимости 0,05. Это подтверждает наличие корреляционной связи между весовыми коэффициентами полинома Z40, показателем RMS HOA и возрастом пациента. Для полинома Z40 и показателя RMS HOA в 6-миллиметровой и 4-миллиметровой зоне роговицы коэффициенты ранговой корреляции были равны 0,520, 0,539 и 0,532 соответственно, что характерно для заметной прямой корреляционной связи согласно шкале Чеддока. RMS HOA в 6-миллиметровой зоне является самым зависимым от возраста показателем из исследуемых. Средняя сила корреляции указанных выше показателей свидетельствует о том, что на их выраженность могут оказывать влияние и другие факторы (например, положение век, состояние слезной пленки), которые не рассматривались в данной работе.

■ **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При оценке аберраций высоких порядков роговицы особое внимание стоит обращать на величину полиномов Z40 и Z3-1, соответствующих сферической аберрации и вертикальной коме, так как они вносят основной вклад в общие аберрации.

Выраженность сферических aberrаций, соответствующих полиному Z40, показателя RMS НОА увеличивается с возрастом пациента, со значительным ростом с 71 года, но на величину aberrаций могут влиять и другие факторы.

Пациенты из возрастных групп от 40 до 45 лет и от 46 до 50 лет являются наиболее предпочтительными кандидатами для имплантации мультифокальных интраокулярных линз из-за низкой выраженности aberrаций высоких порядков роговицы в этом возрастном периоде.

Имплантация мультифокальных интраокулярных линз пациентам 71 года и старше нежелательна из-за роста вероятности негативных оптических эффектов после имплантации.

Пациенты в возрасте от 51 года до 70 лет требуют уточнения значений весовых коэффициентов aberrаций высоких порядков роговицы с помощью протокола анализа Цернике на соответствующем оборудовании.

Высока вероятность роста выраженности или появления негативных оптических эффектов у пациентов после 71 года, которым ранее были имплантированы мультифокальные интраокулярные линзы.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Khorin P., Khonina S., Karsakov A., Branchevsky S. Analysis of aberrations of the human cornea. *Computer Optics*. 2016;40(6):810–817. doi: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817 (in Russian)
2. Khvan D., Fedyashev G. Higher-order aberrations – the choice of optimal intraocular correction in cataract surgery. Literature review. *Ophthalmology*. 2024;21(1):51–57. (in Russian)
3. Averich V., Egorova G. Optical aberrations of the eye in keratoconus. *Clinical ophthalmology*. 2022;22(3):168–174. doi: 10.32364/2311-7729-2022-22-3-168-174 (in Russian)
4. Thibos L., Applegate R., Schwiegering J., Webb R. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg*. 2002;18:652–660.
5. Porter J., Guirao A., Cox I., Williams D. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. *J Opt Soc Am*. 2001;18:1793–1803.
6. Applegate R., Donnelly W., Marsack J., Koenig D. Three-dimensional relationship between high-order root-mean-square wavefront error, pupil diameter, and aging. *J Opt Soc Am*. 2007;24:578–587.
7. Neroev V., Tarutta E., Khanjyan A., Arutyunyan S., Markosyan G., Khodjabekyan N. Aberrations of the optical system of the eye in myopia of varying degrees. *Bulletin of Ophthalmology*. 2021;137(5):14–21. (in Russian)
8. Khorin P., Ilyasova N., Paringer R. Extraction of informative features based on the coefficients of Zernike polynomials for various pathologies of the human cornea. *Computer Optics*. 2018;42(1):159–166. doi: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-159-166 (in Russian)
9. Aliev A.-G.D., Ismailov M. Modern methods of studying aberrations of the optical system of the eye and their clinical significance. *Modern technologies of cataract and refractive surgery: VII international. scientific and practical. conf., October 27–28, 2006: collection of scientific articles*. M., 2006:322–324. (in Russian)
10. Malyugin B., Tereshchenko A., Bely Yu. Comparison of the results of implantation of spherical and aspherical intraocular lenses in cataract surgery. *Modern technologies of cataract and refractive surgery – 2011: Collection of scientific articles*. Federal State Institution Scientific and Technical Complex "Microsurgery of the Eye". Moscow. 2011:185–191. (in Russian)
11. Balashevich L., Stakheev A., Khakimov A. Functional and optical results of implantation of spherical and aspherical intraocular lenses into the capsular bag. *Oftalmoshir*. 2009;5:29–33. (in Russian)