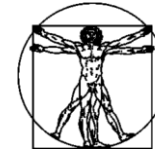


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2019.2.02
УДК 531/534 [57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

УТОЧНЕННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ И ТОТАЛЬНЫХ АБЕРРАЦИЙ У ПАЦИЕНТОВ С ЭММЕТРОПИЕЙ И АНОМАЛИЯМИ РЕФРАКЦИИ

А.Б. Качанов^{1,2}, В.В. Корников³, С.М. Бауэр³, И.М. Архипова³, Б.А. Зимин⁴

¹ Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного учреждения межотраслевого научно-технического комплекса «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова Минздрава России, Россия, 192283, Санкт-Петербург, ул. Ярослава Гашека, 21, e-mail: Andrey_kachanov@yahoo.com

² Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова Минздрава России, Россия, 191015, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9, e-mail: v.kornikov@spbu.ru

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет речного и морского флота имени адмирала С.О. Макарова, Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Аннотация. Проведен статистический анализ зависимости тотального уровня aberrаций и интегрального уровня aberrаций высших порядков (здесь и далее – aberrаций высших порядков) в зависимости от вида клинической рефракции и степени аметропии. Выполненные расчеты позволили сделать вывод о том, что aberrации высших порядков присущи как глазам с эметропией (нормальным зрением), так и глазам с аметропиями (миопией и гиперметропией). Оказалось, что тотальный уровень aberrаций глаза в целом напрямую коррелирует со степенью аметропии и статистически значимо возрастает при увеличении степени аметропии (сферического компонента рефракции). Aberrации же высших порядков практически не меняются на глазах с эметропиями и аномалиями рефракции. По уточненным данным выявлено, что на глазах с гиперметропией слабой и средней степени интегральный уровень aberrаций высших порядков выше, чем при миопии и эметропии, но с незначительной статистически достоверной разницей.

Ключевые слова: клиническая aberrометрия, aberrации высших порядков, сферический компонент рефракции, аномалии рефракции, аметропии, общие (тотальные) aberrации.

ВВЕДЕНИЕ

Глазу человека, как и любой реальной оптической системе, присущи оптические погрешности в виде различных aberrаций, в том числе сферической, aberrаций косых пучков (кома) и прочее. В отличие от дефокусировок (аномалии рефракции, аметропии и aberrации низших порядков), т.е. миопии и гиперметропии, их называют aberrациями высшего порядка [3–5].

© Качанов А.Б., Корников В.В., Бауэр С.М., Архипова И.М., Зимин Б.А., 2019

Качанов Андрей Борисович, к.м.н., офтальмохирург, доцент кафедры офтальмологии, Санкт-Петербург
Корников Владимир Васильевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры управления медико-биологическими системами, Санкт-Петербург

Бауэр Светлана Михайловна, д.ф.-м.н., проф. кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

Архипова Инга Михайловна, к.ф.-м.н., доцент кафедры общей математики и информатики, Санкт-Петербург

Зимин Борис Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры прикладной математики, Санкт-Петербург

Как известно, до начала 2000-х гг. в офтальмологии изучение аберраций высших порядков практически не проводилось из-за отсутствия соответствующих высокоточных измерительных приборов. Однако в связи с появлением на мировом офтальмологическом рынке в 2000-е гг. первых высокоточных абберрометров перед врачами-клиницистами и исследователями глаза открылись уникальные перспективы диагностики и учета аберраций высших порядков в разработке оптического дизайна искусственных хрусталиков или, например, при исследовании роговицы [1]. Применение клинической абберрометрии позволило улучшить диагностику таких патологических состояний, как кератоконус, начальный подвывих хрусталика, изменения оптики глаза при начальной ядерной или кортикальной катаракте и т.д., а также способствовало улучшению точности лазерной коррекции у рефракционных пациентов [2, 9, 10].

Однако в клинической офтальмологии остаются очень важными и интересными вопросы присутствия аберраций низшего и высшего порядков в соразмеренных глазах эмметропов, людей с высокими зрительными функциями и хорошей зрительной работоспособностью, а также соотношение показателей абберрометрии на глазах с эмметропиями и аномалиями рефракции (миопией и гиперметропией).

КЛИНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В Санкт-Петербургском филиале федерального государственного автономного учреждения межотраслевого научно-технического комплекса «Микрохирургия глаза» имени академика С.Н. Федорова были выполнены абберрометрические исследования на 481 глазе пациентов с эмметропией и аномалиями рефракции. В данной работе для анализа данных Хартманна-Шек-абберрометрии учитывались следующие показатели, полученные на абберрометрах *WASCA* и *CRS-Master (Carl Zeiss Meditec)*:

- *Sph* – сферический компонент рефракции глаза;
- *PV OPD* – тотальный уровень всех аберраций (низшего и высшего порядков);
- *PVD OPD HO* – интегральный уровень аберраций высших порядков.

По клинической рефракции выборка из глаз пациентов была разделена на семь групп [10]:

- Миопия слабой степени – 96 глаз.
- Миопия средней степени – 165 глаз.
- Миопия высокой степени – 70 глаз.
- Эмметропия (соразмеренная рефракция) – 32 глаза.
- Гиперметропия слабой степени – 52 глаза.
- Гиперметропия средней степени – 36 глаз.
- Гиперметропия высокой степени – 30 глаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представляет интерес сравнение построенных групп по показателю *PVD OPD HO*. Представленные на рис. 1–7 гистограммы (по критерию Колмогорова – Смирнова) распределения показателя *PVD OPD HO* являются нормальными. Это подтверждает использование критерия согласия Пирсона.

Исследуем корреляции между сферическим компонентом рефракции и показателем уровня аберраций высших порядков r_s в группах по степени рефракции. Значения коэффициентов корреляции и доверительные интервалы для регрессии представлены на рис. 8–14.

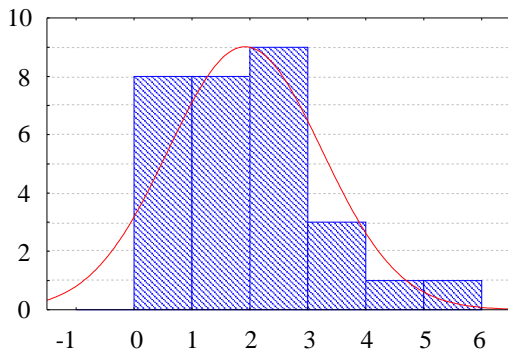


Рис. 1. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы гиперметропии высокой степени ($d = 0,15651$, $p > 0,2$, вероятность Лиллиефорса $p < 0,1$)

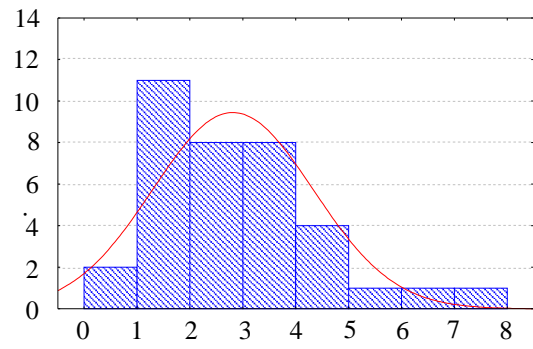


Рис. 2. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы гиперметропии средней степени ($d = 0,11562$, $p > 0,2$, вероятность Лиллиефорса $p > 0,2$)

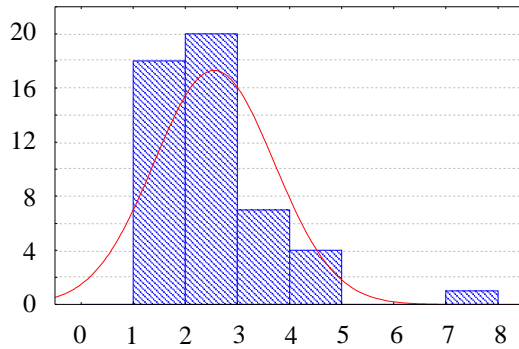


Рис. 3. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы гиперметропии легкой степени ($d = 0,14870$, $p > 0,2$, вероятность Лиллиефорса $p < 0,1$)

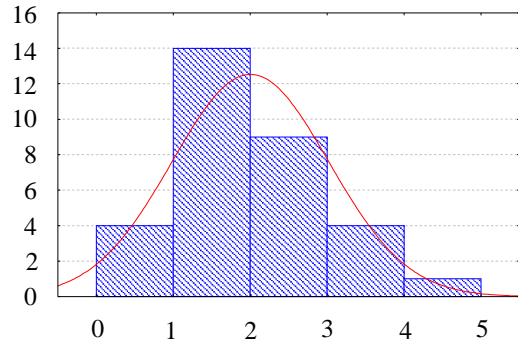


Рис. 4. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы эметропии ($d = 0,12622$, $p > 0,2$, вероятность Лиллиефорса $p > 0,2$)

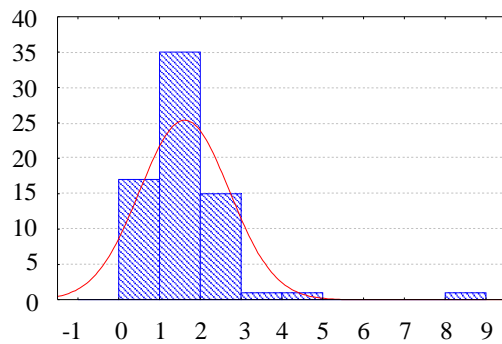


Рис. 5. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы миопии высокой степени ($d = 0,15543$, $p < 0,1$, вероятность Лиллиефорса $p < 0,1$)

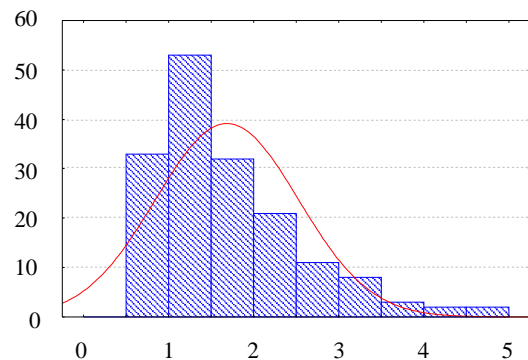


Рис. 6. Гистограмма для *PVD OPD HO* группы миопии средней степени ($d = 0,11640$, $p < 0,05$, вероятность Лиллиефорса $p < 0,1$)

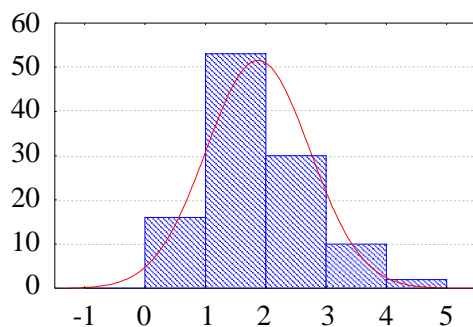


Рис. 7 Гистограмма для *PVD OPD HO* группы миопии легкой степени ($d = 0,08478$, $p < 0,05$, вероятность Лиллиефорса $p > 0,2$)

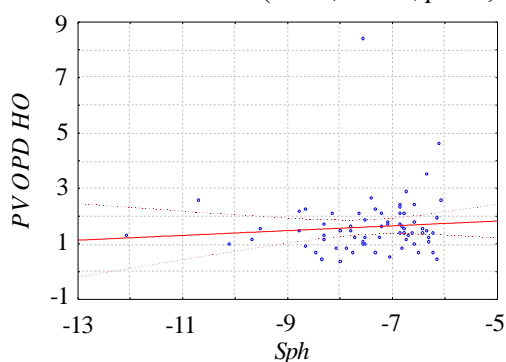


Рис. 8. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы миопии высокой степени ($r = 0,08932$)

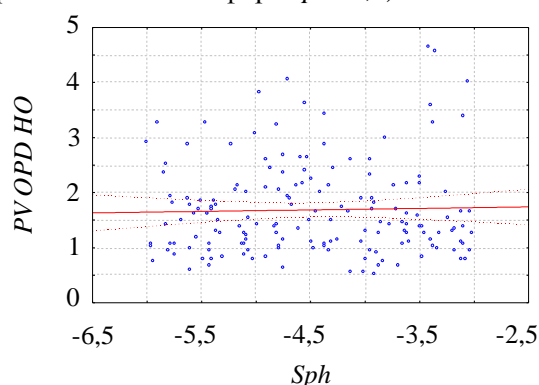


Рис. 9. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы миопии средней степени ($r = 0,02755$)

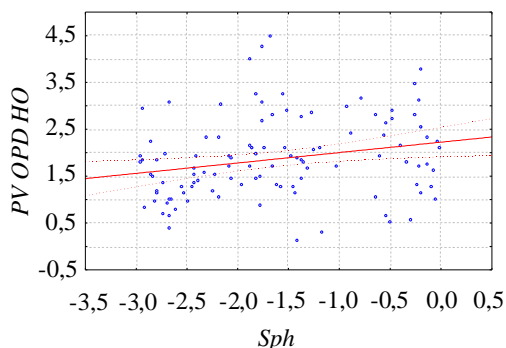


Рис. 10. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы миопии легкой степени ($r = 0,23801$)

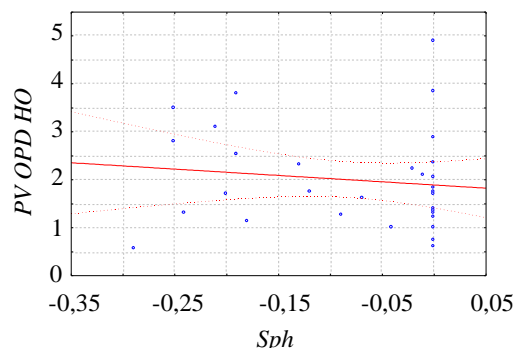


Рис. 11. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы эмметропии ($r = -0,1311$)

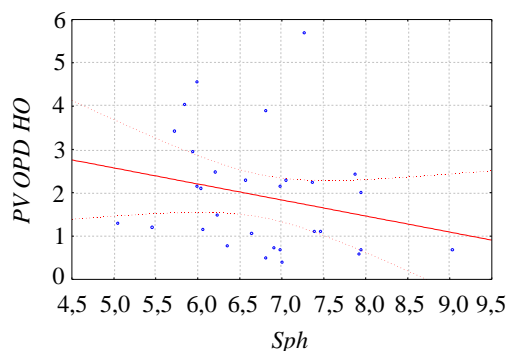


Рис. 12. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы гиперметропии высокой степени ($r = 0,2461$)

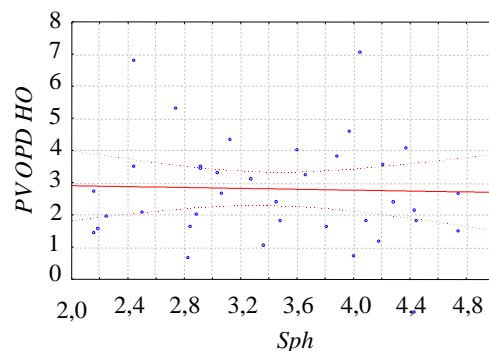


Рис. 13. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* группы гиперметропии средней степени ($r = 0,0343$)

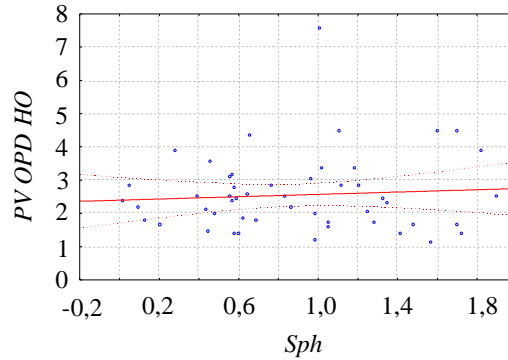


Рис. 14. Корреляция между *PVD OPD HO* и *Sph* групп гиперметропии легкой степени ($r = 0,07509$)

Как видно из расчетов, при миопии слабой степени ($r_s = -0,23$) зависимость между *PVD OPD HO* и *Sph* статистически значима при $\alpha = 0,05$. При миопии средней ($r_s = -0,03$) и высокой ($r_s = -0,09$) степени зависимость статистически незначима при $\alpha = 0,05$. Для группы эметропии коэффициент корреляции между *PVD OPD HO* и *Sph* равен $r_s = -0,13$. Зависимость статистически значима при $\alpha = 0,05$.

Для гиперметропии высокой степени коэффициент корреляции между *PVD OPD HO* и *Sph* равен $r_s = -0,25$. Зависимость статистически значима при $\alpha = 0,05$. Для гиперметропии слабой и средней степени зависимость между *PVD OPD HO* и *Sph* не является статистически значимой при $\alpha = 0,05$.

Таблица 1

Сравнение групп по степени рефракции

Показатель	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>N</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Миопия высокой степени	1,616857	1,099982	70	233	-0,525793	0,599532
Миопия средней степени	1,686242	0,840788	165			
Миопия средней степени	1,686242	0,840788	165	257	-1,37902	0,169087
Миопия легкой степени	1,836809	0,852140	94			
Миопия легкой степени	1,836809	0,852140	94	124	-0,907913	0,365686
Эметропия	2,003437	1,018847	32			
Эметропия	2,003437	1,018847	32	80	-2,20433	0,030375
Гиперметропия легкой степени	2,553800	1,152876	50			
Гиперметропия легкой степени	2,553800	1,152876	50	84	-0,900852	0,370243
Гиперметропия средней степени	2,813333	1,519389	36			
Гиперметропия средней степени	2,813333	1,519389	36	64	2,523745	0,014104
Гиперметропия высокой степени	1,917667	1,327509	30			

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически различимые группы.

Исследуем возможные различия средних значений между представленными выше семью группами рефракции. Для этого воспользуемся *t*-критерием для независимых выборок [8].

Результаты сравнения групп по степени рефракции (показатель *PVD OPD HO*) приведены в табл. 1.

Диаграммы размаха *PVD OPD HO*, представленные на рис. 15–20, для изучаемых групп также свидетельствуют о наличии различий в выделенных жирным шрифтом группах. Статистическое исследование показало наличие статистически значимых различий по показателю *PVD OPD HO* только между группами гиперметропии средней и гиперметропии высокой степени, а также между группами эмметропии и гиперметропии легкой степени.

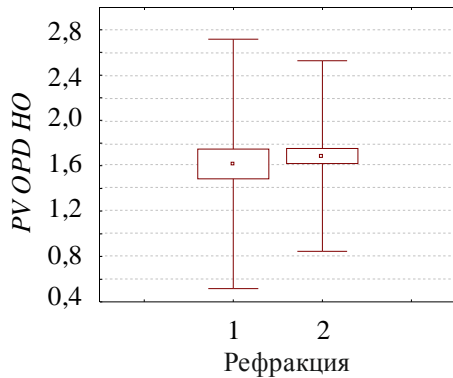


Рис. 15. Миопия высокой и средней степени

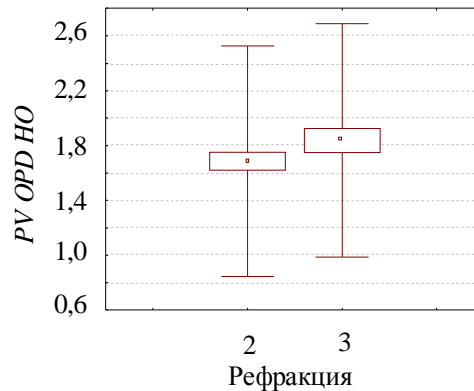


Рис. 16. Миопия средней и легкой степени

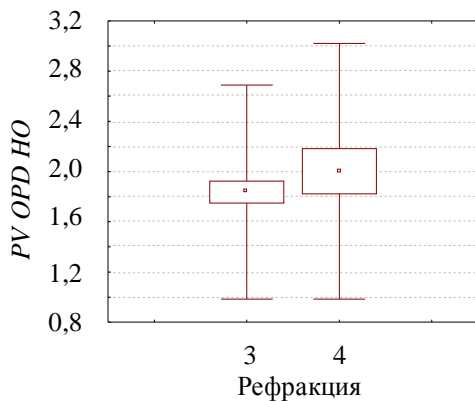


Рис. 17. Миопия легкой степени и эмметропия

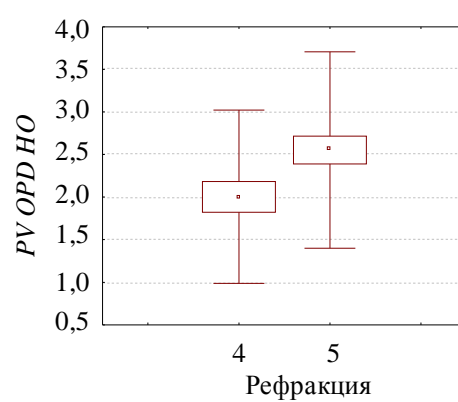


Рис. 18. Эмметропия и гиперметропия легкой степени

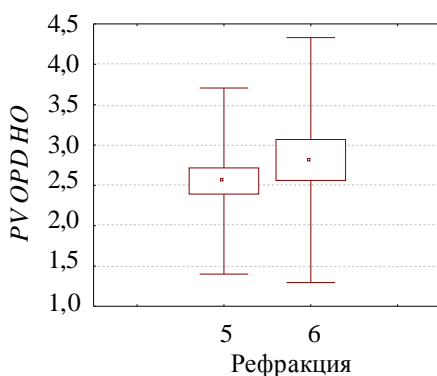


Рис. 19. Гиперметропия легкой и средней степени

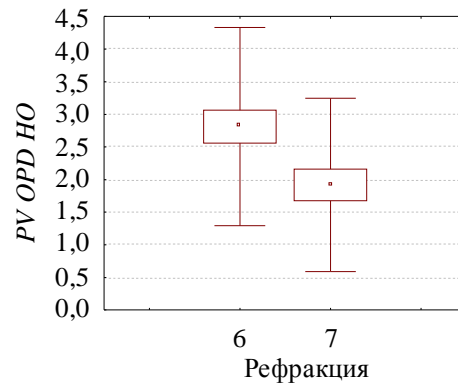


Рис. 20. Гиперметропия средней и высокой степени

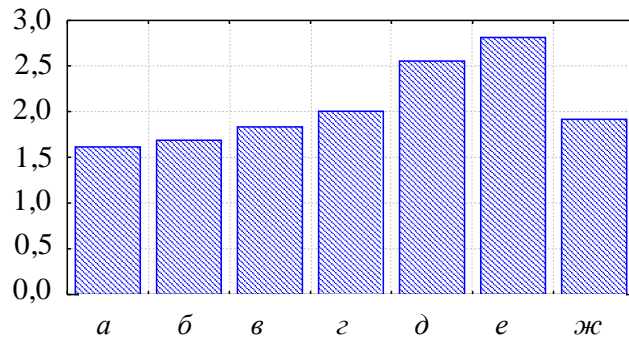


Рис. 21. Значения средних величин показателя *PVD OPD HO* в группах: миопия высокой степени (а), миопия средней степени (б), миопия легкой степени (в), эмметропия (г), гиперметропия легкой степени (д), гиперметропия средней степени (е), гиперметропия высокой степени (ж)

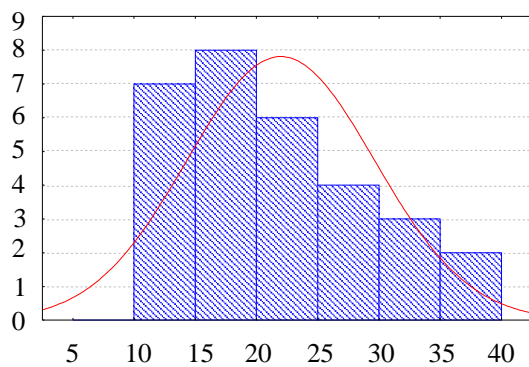


Рис. 22. Гистограмма для *PV OPD* группы гиперметропии высокой степени

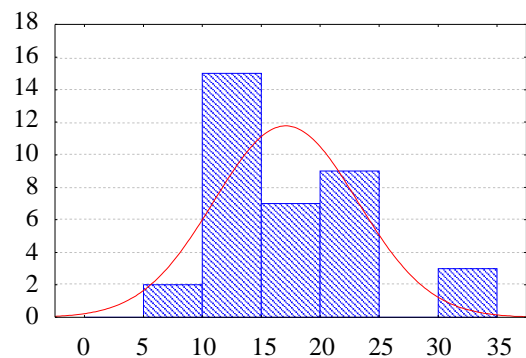


Рис. 23. Гистограмма для *PV OPD* группы гиперметропии средней степени

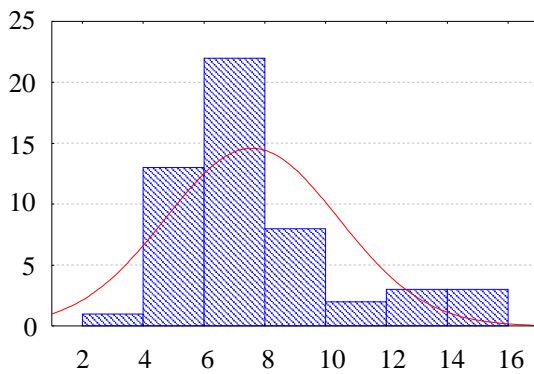


Рис. 24. Гистограмма для *PV OPD* группы гиперметропии легкой степени

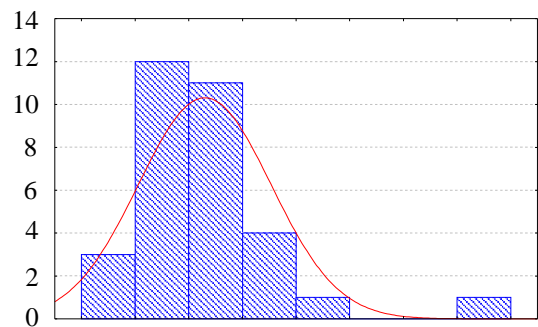


Рис. 25. Гистограмма для *PV OPD* группы эмметропии

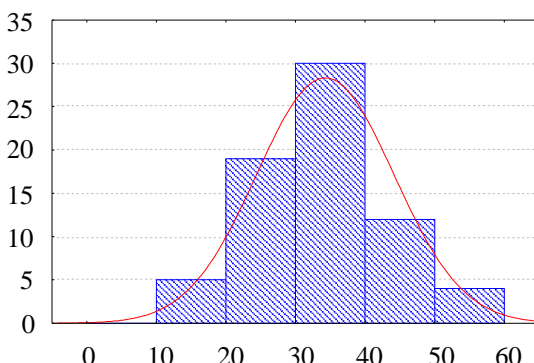


Рис. 26. Гистограмма для *PV OPD* группы миопии высокой степени

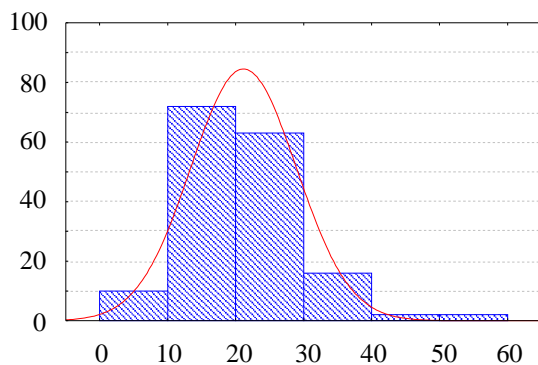


Рис. 27. Гистограмма для *PV OPD* группы миопии средней степени

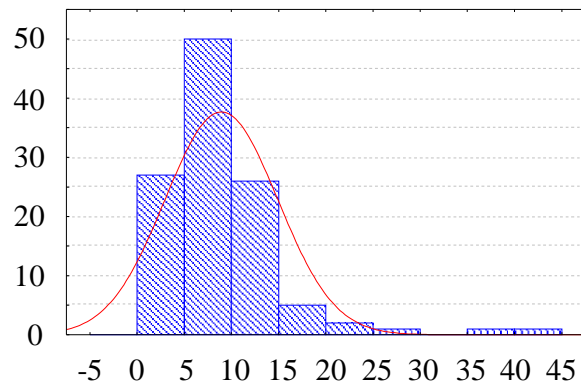


Рис. 28. Гистограмма для *PV OPD* группы миопии легкой степени

Для наглядности возможные различия между группами рефракции по показателю *PVD OPD HO* представлены на рис. 21 средними значениями величин *PVD OPD HO* в группах.

Аналогичное исследование было проведено с суммарным (тотальным) уровнем всех аберраций глаза, включая низшие и высшие, который описывается показателем *PV OPD*.

Кроме того, были исследованы гистограммы распределений показателя *PV OPD* в группах, различающихся по степени рефракции, которые показаны на рис. 15–28.

Приведенные гистограммами распределения показателя *PV OPD* также представляются нормальными. Это подтверждает статистическая проверка с использованием критерия согласия Пирсона.

Исследуем корреляции между сферическим компонентом рефракции и показателем уровня тотальных аберраций в группах по степени рефракции. Значения коэффициентов корреляции и доверительные интервалы для регрессии представлены на рис. 29–35.

Как видно из представленных рисунков, только для группы эмметропии наблюдается зависимость слабой степени ($r_s = -0,12$), для всех остальных групп зависимость между *PV OPD* и *Sph* статистически значима при $\alpha = 0,01$. При миопии средней степени $r_s = -0,51$, при миопии высокой степени $r_s = -0,4$, при миопии легкой степени $r_s = -0,51$. Для гиперметропии высокой степени коэффициент корреляции между *PV OPD* и *Sph* равен $r_s = -0,31$. Для гиперметропии слабой и средней степени ($r_s = -0,72$ и $r_s = -0,46$ соответственно).

Исследуем возможные различия в средних значениях между представленными выше семью группами рефракции. Для этого воспользуемся *t*-критерием для независимых выборок [8].

Результаты сравнения групп по степени рефракции (показатель *PV OPD*) приведены в табл. 2.

Таблица приведенных статистических сравнений показывает, что все группы попарно различимы.

Диаграммы размаха *PV OPD* для изучаемых групп, представленные на рис. 36–41, также свидетельствуют о наличии различий в группах. Статистическое исследование показало наличие статистически значимых различий по показателю *PV OPD* между всеми семью группами на уровне значимости 0,01.

Для наглядности возможные различия между группами рефракции по показателю *PV OPD* представлены на рис. 42 средними значениями величин *PV OPD* в группах.

В данной работе с помощью статистического анализа установлено, что аберрометрия – важная уточняющая методика исследования у рефракционных пациентов. Тотальный уровень аберраций определяется, прежде всего, дефокусом (абберациями низшего порядка) и коррелирует со сферическим эквивалентом (компонентом) рефракции. Уменьшение же интегрального уровня аберраций высших порядков при увеличении степени аметропий объясняется, вероятно, «масштабным эффектом» – при экстремальном уровне аберраций низших порядков (дефокуса) нивелируется влияние аберраций высших порядков. Так, например, на панорамном снимке поверхности горы деревья в лесу практически не воспринимаются («мелкие объекты»), а на объектном снимке в лесу – каждое дерево выразительно воспринимается («крупные объекты»).

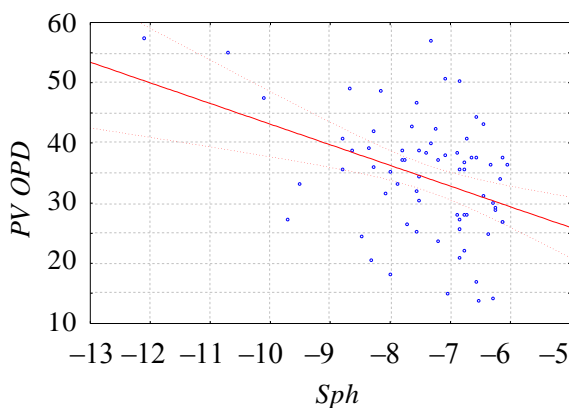


Рис. 29. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы миопии высокой степени

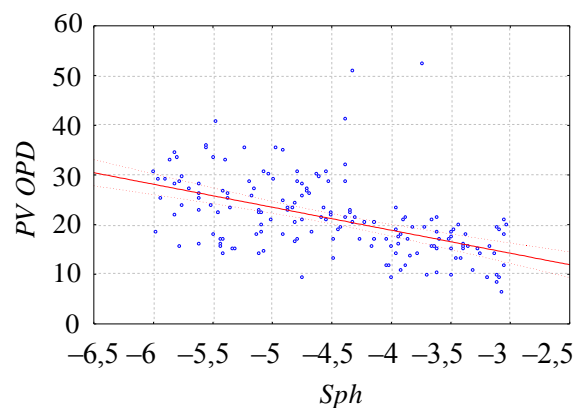


Рис. 30. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы миопии средней степени

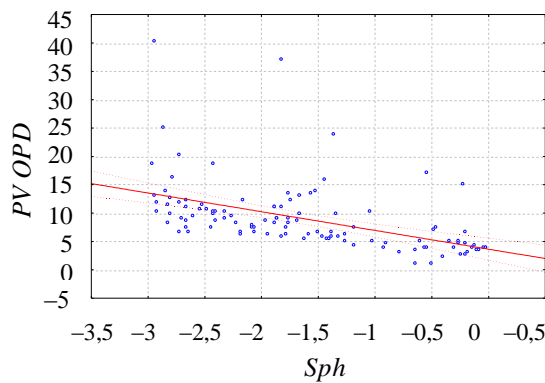


Рис. 31. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы миопии легкой степени

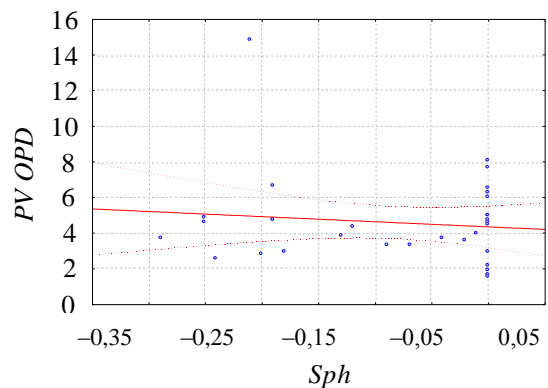


Рис. 32. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы эметропии

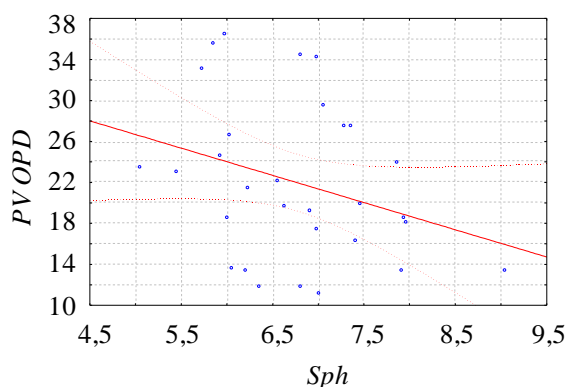


Рис. 33. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы гиперметропии высокой степени

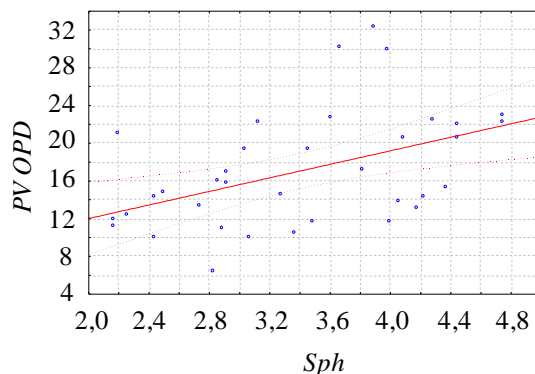


Рис. 34. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы гиперметропии средней степени

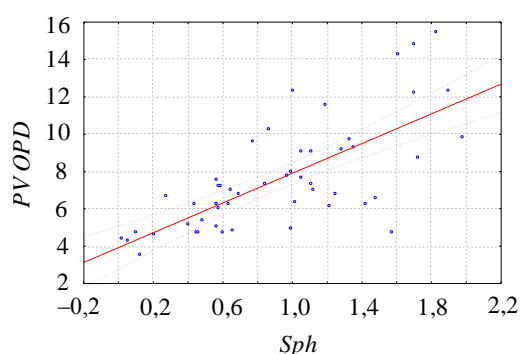


Рис. 35. Корреляция между *PV OPD* и *Sph* группы гиперметропии легкой степени

Таблица 2

Сравнение групп по степени рефракции (показатель *PV OPD*)

Показатель	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>N</i>	<i>df</i>	<i>T</i>	<i>p</i>
Миопия высокой степени	34,27243	9,861157	70	233	10,86967	0,000000
Миопия средней степени	21,16467	7,786538	165			
Миопия средней степени	21,16467	7,786538	165	259	12,40174	0,000000
Миопия легкой степени	9,691563	6,077924	96			
Миопия легкой степени	9,691563	6,077924	96	126	4,605554	0,000010
Эмметропия	4,597500	2,476465	32			
Эмметропия	4,597500	2,476465	32	82	-4,89569	0,000005
Гиперметропия легкой степени	7,578269	2,842419	52			
Гиперметропия легкой степени	7,578269	2,842419	52	86	-9,81164	0,000000
Гиперметропия средней степени	17,07417	6,098145	36			
Гиперметропия средней степени	17,07417	6,098145	36	64	-2,89724	0,005148
Гиперметропия высокой степени	21,98067	7,660888	30			

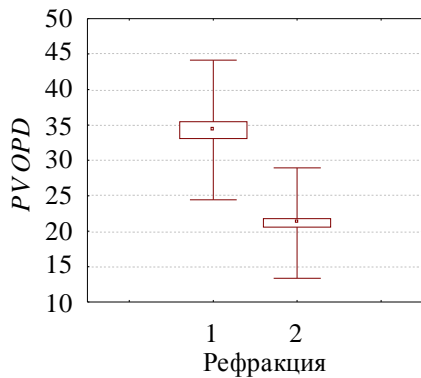


Рис. 36. Миопия высокой и средней степени

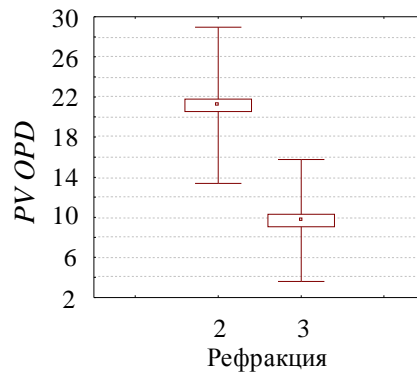


Рис. 37. Миопия средней и легкой степени

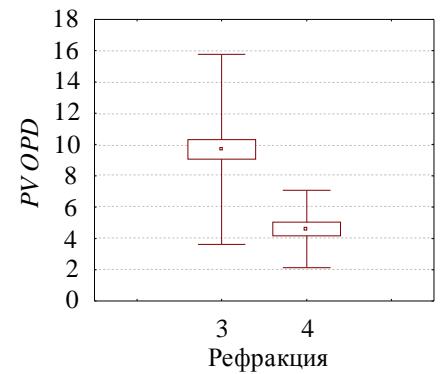


Рис. 38. Миопия легкой степени и эмметропия

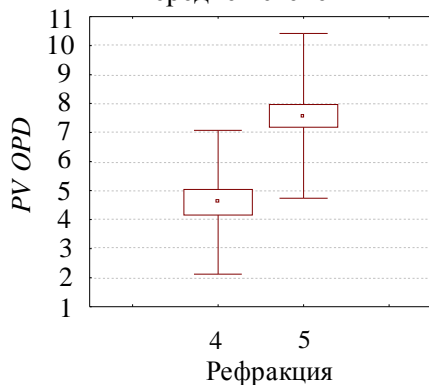


Рис. 39. Эмметропия и гиперметропия легкой степени

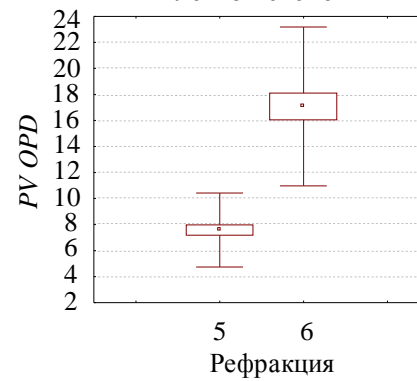


Рис. 40. Гиперметропия легкой и средней степени

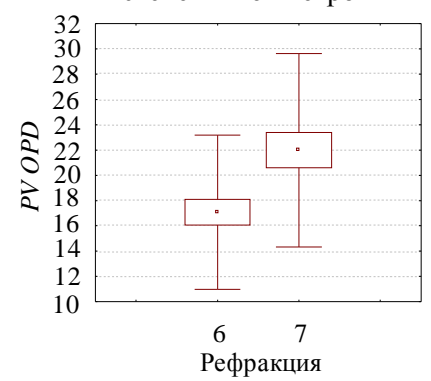


Рис. 41. Гиперметропия средней и высокой степени

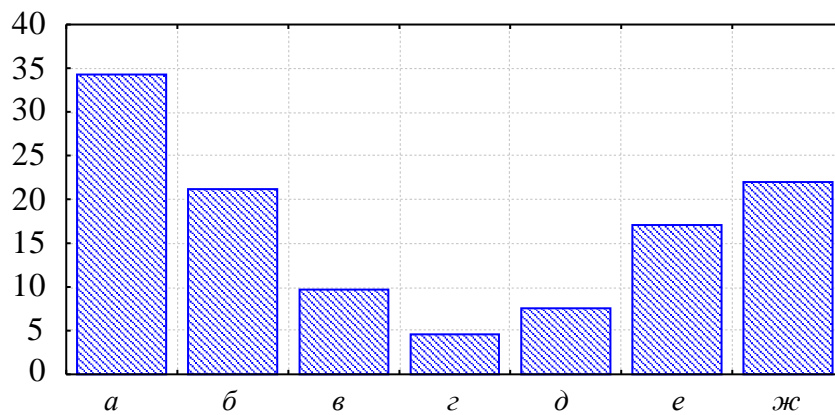


Рис. 42. Значения средних величин показателя $PV\ OPD$ в группах: миопия высокой степени (а), миопия средней степени (б), миопия легкой степени (в), эмметропия (г), гиперметропия легкой степени (д), гиперметропия средней степени (е), гиперметропия высокой степени (ж)

Выводы

Показана известная закономерность, что аберрации высших порядков присущи как глазам с эмметропией (нормальным зрением), так и глазам с аметропиями (миопией и гиперметропией). Оказалось, что тотальный уровень аберраций глаза в целом напрямую коррелирует со степенью аметропии и статистически значимо возрастает при увеличении степени аметропии (сферического компонента рефракции).

В данной работе не только уточняется важный факт с точки зрения нормальной физиологии глаз с эметропией – наличие aberrаций высшего порядка абсолютно естественно и для высокозрячего эметропического глаза, но и доказывается, что aberrации высших порядков практически не меняются на глазах с эметропиями и аномалиями рефракции. Установлено, что на глазах с гиперметропией слабой и средней степени интегральный уровень aberrаций высших порядков был незначительно выше, чем при миопии и эметропии, но с небольшой статистически достоверной разницей. В эволюционном плане, скорее всего, именно наличие aberrаций высших порядков на глазах с эметропией позволяет воспринимать минимальные световые раздражители из-за кругов светорассеяния, создаваемых на сетчатке благодаря сферическим aberrациям высшего порядка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00832-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветисов С.Э., Шелудченко В.М. Нужно ли нам суперзрение? Aberrации глаза // Клиническая физиология зрения / под ред. А.М. Шамшиновой. – М.: Научно-медицинская фирма МБН, 2006. – С. 488–501.
2. Балашевич Л.И., Качанов А.Б. Клиническая корнеотопография и абберометрия. – М., 2008. – 168 с.
3. Балашевич Л.И., Качанов А.Б., Бауэр С.М., Зимин Б.А. Абберометрия при эметропии и аномалиях рефракции // Биомеханика глаза. – 2005. – С. 202–203.
4. Балашевич Л.И., Качанов А.Б., Варавка А.А., Бауэр С.М., Зимин Б.А. Клиническая абберометрия при патологии хрусталика // Вестник ОГУ. – 2013. – № 4. – С. 36–39.
5. Балашевич Л.И., Качанов А.Б., Никулин С.А. и др. Первые результаты исследования сферических aberrаций высокого порядка при эметропии // Федоровские чтения – 2002: науч.-практ. конф. по вопросам коррекции аномалий рефракции: сб. науч. ст. / под ред. Х.П. Тахчиди. – М., 2002. – С. 52–57.
6. Воронкова Е.Б., Еременко А.А., Качанов А.Б., Корников В.В. Статистический анализ взаимосвязи уровня aberrаций высших порядков и сферического компонента рефракции // Современные проблемы механики сплошной среды: тр. 18-й междунар. конф. – Ростов н/Д: Киби Медиа Центр ЮФУ, 2016. – Т. 1. – С. 140–144.
7. Воронкова Е.Б., Корнилов В.В., Качанов А.Б. Статистическое исследование взаимосвязи aberrаций высших порядков со сферическим компонентом рефракции // Российский журнал биомеханики. – 2017. – Т. 21, № 4. – С. 388–397.
8. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / под ред. В.Э. Фигурнова – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 528 с.
9. Raquin M.P., Hamam H., Simonet P. Objective measurement of optical aberrations in myopic eyes // *Optom. Optic Vis. Sci.* – 2002. – Vol. 79, № 5. – P. 285–291.
Porter J., Guirao A., Cox I.G., Williams D.R. Monochromatic aberrations of the human eyes in a large population // *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* – 2001. – Vol. 18, № 8. – P. 1793–1803.

AUPDATED STATISTICAL ANALYSIS OF HIGHER ORDER ABERRATIONS AND TOTAL ABERRATIONS IN PATIENTS WITH EMMETROPY AND REFRACTIVE ANOMALIES

**A.B. Kachanov, V.V. Kornikov, S.M. Bauer, I.M. Arkhipova, B.A. Zimin
(Saint-Petersburg, Russia)**

The authors performed a statistical analysis of the dependence of the total level of aberrations and the integral level of higher-order aberrations (hereafter, higher-order aberrations) depending on the type of clinical refraction and the degree of ametropia. The calculations made it possible to conclude that higher-order aberrations are characteristic of both eyes with emmetropia (“normal vision”) and eyes with ametropia (myopia and hyperopia). It turned out that the total level of eye aberrations in general directly correlates with the degree of ametropia and statistically significantly increases with an increase in the degree of ametropia (spherical component of refraction). Higher-order aberrations are practically unchanged in front of eyes with emetropia and ametropia. According to updated data, the authors found that in the eyes with weak and moderate hypermetropia, the integral level of higher-order aberrations is higher than with myopia and emetropia, but with a slight statistically significant difference.

Key words: clinical aberrometry, higher-order aberrations, spherical component of refraction, refractive errors, ametropia, general (total) aberrations.

Получено 2 апреля 2019