

УДК 681.7.067.2

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-193-200>

## К вопросу о влиянии хроматизма положения изображения на частотно-контрастную характеристику объектива

*Е. В. Шмелев<sup>1,2</sup>✉, Т. Н. Хацевич<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Оптическое Расчетное Бюро», г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: [shmelev@orb-nsk.ru](mailto:shmelev@orb-nsk.ru)

**Аннотация.** Разработка высокоразрешающих оптических систем объективов является актуальной задачей оптического приборостроения и требует тщательного анализа aberrаций на различных этапах проектирования. В основе исследования лежит гипотеза о том, что в реальной оптической системе, имеющей определенный уровень остаточных aberrаций, хроматизм положения изображения может оказывать положительное влияние на модуляционную передаточную функцию (МПФ, частотно-контрастную характеристику). Предлагается алгоритм расчета МПФ для оптической системы, в которой полностью устранен хроматизм положения, но сохранен характер сферохроматических aberrаций. Алгоритм позволяет оценить влияние хроматических aberrаций на МПФ. На примере двух инженерных решений показано, что возможно как отрицательное, так и положительное влияние хроматизма положения на МПФ оптической системы. Анализ примеров подтверждает возможность взаимобалансировки сферической aberrации и хроматизма положения изображения. Предложенный алгоритм может служить инструментом для проектирования высокоразрешающих оптических систем объективов.

**Ключевые слова:** хроматизм положения, частотно-контрастная характеристика, модуляционно-передаточная функция, сферическая aberrация, балансировка aberrаций

### Для цитирования:

Шмелев Е. В., Хацевич Т. Н. К вопросу о влиянии хроматизма положения изображения на частотно-контрастную характеристику объектива. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 6. С. 193–200. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-193-200>

## Influence of image-plane chromatism on lens frequency-contrast performance

*E. V. Shmelev<sup>1,2</sup> ✉, T. N. Khatsevich<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Optical Design Office, LLC, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: [shmelev@luggar.biz](mailto:shmelev@luggar.biz)

**Abstract.** The development of high-resolution objective lens optical systems represents a pressing challenge in optical instrument engineering, demanding rigorous aberration analysis across all design stages. The study hypothesizes that, within actual optical systems exhibiting residual aberrations, chromatic aberration of image position may exert a beneficial effect on the modulation transfer function (MTF; frequency-contrast characteristic). A computational algorithm is proposed for evaluating the MTF of an optical system in which image position chromatism is entirely eliminated, while retaining the signature of spherochromatic aberrations; this facilitates precise quantification of chromatic aberration impacts on MTF. Examination of two engineering case studies reveals that image position chromatism can induce either deleterious or advantageous effects on system MTF. These findings substantiate the feasibility of balancing spherical aberration against image position chromatism. Thus, the introduced algorithm constitutes a valuable instrument for the design of high-resolution objective lenses.

**Keywords:** chromatic aberration, frequency contrast characteristic, modulation transfer function, spherical aberration, aberration balancing

**For citation:**

Shmelev E. V., Khatsevich T. N. (2025). Influence of image-plane chromatism on lens frequency-contrast performance. *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 30, No. 6. pp. 193–200. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-193-200>

**Введение**

Одним из ключевых вопросов при разработке оптических систем объективов оптических и оптико-электронных приборов является вопрос о критериях оценки качества изображения, формируемого оптической системой [1–4]. Но еще более интересным является вопрос о том, как можно достичь этих критериев в разрабатываемой оптической системе при одновременном обеспечении целого ряда дополнительных требований: массогабаритных, технологических, стоимостных. Прикладные методы расчета оптических систем включают в процесс оценки качества изображения множество параметров и характеристик: геометрические aberrации (хроматические и монохроматические), aberrации волнового фронта, aberrации третьих и высших порядков, число Штреля, критерий Маршала, функцию рассеяния точки (ФРТ), частотно-контрастную характеристику, или модуляционно-передаточную функцию и др. [5].

Инженерная практика проектирования оптических систем объективов сложилась таким образом, что на начальном этапе их расчета используются геометрические и волновые aberrации, позволяющие обеспечить быстрое приближение характеристик текущего дизайна оптической системы к технически требуемым, а на поздних этапах расчета,

когда глобальный дизайн оптической системы определен, оценка качества изображения ведется по интегральным характеристикам, например по значениям МПФ на требуемых пространственных частотах  $\nu$  [6–9]. Интегральный характер последней характеристики требует для ее расчета использования кратно большего количества лучей и, соответственно, более длительного времени для вычисления [10]. Представляется целесообразным уже на начальном этапе разработки конкретной оптической системы иметь возможность оценить влияние отдельных геометрических aberrаций на МПФ. Это позволит для конкретной системы на начальных этапах ее разработки определиться с критериями на значения отдельных aberrаций.

На этапе структурного синтеза оптической системы закладываются количество компонентов и их оптические силы, тогда как на этапе параметрического синтеза определяются конструктивные параметры компонентов и их материалы. В процессе инженерной разработки оптической системы переход от структурного синтеза к параметрическому может осуществляться как в прямом, так и в обратном направлениях: в случае, если на этапе параметрического синтеза становится понятно, что текущее количество компонентов не может по тем или иным причинам обеспечить выполнение предъявляемых к системе требований, то осуществ-

ляется возврат на этап структурного синтеза. Нечеткая последовательность синтеза системы также обусловлена эвристическим характером определения количества линз в компонентах системы [11].

Статья посвящена рассмотрению влияния хроматических aberrаций положения на МПФ объектива. Причина появления хроматических aberrаций в оптической системе обусловлена нелинейным характером изменения показателя преломления в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$ , присущего всем оптическим материалам. Таким образом, изменение aberrаций изображения, формируемого оптической системой, в зависимости от длины волны излучения является неизбежным явлением, поэтому возможность коррекции хроматических aberrаций изображения закладывается уже на этапе создания стартовой системы. Одним из возможных критериев успешного синтеза стартовой системы может являться такой характер коррекции хроматических aberrаций изображения, который обеспечивал бы наиболее высокие значения коэффициента передачи модуляции (контраста) в рабочем диапазоне пространственных частот.

### Методы и моделирование

В основе данного исследования лежит гипотеза о том, что в реальной оптической системе, имеющей определенный уровень остаточных aberrаций, хроматизм положения изображения может оказывать положительное влияние на МПФ. Далее рассматривается формирование изображения осевой точки изображения в осесимметричном объективе с целью показать возможность взаимобалансировки сферической aberrации и хроматизма положения изображения.

В основе рассматриваемого метода лежит сравнительное исследование снижения МПФ системы для осевой точки изображения при том или ином уровне продольной хроматической aberrации в параксиальной области зрачка и эквивалентной компьютерной модели системы, для которой эта aberrация скомпенсирована. Наличие сферохроматической aberrации, обуславливая изменение сферической aberrации по зрачку с длиной волны излучения, определяет тот факт, что

наличие продольных хроматических aberrаций в параксиальной области зрачка определяет свою плоскость установки для каждой длины волны. Совместная оптимизация хроматических aberrаций и сферической aberrации позволяет найти решение, при котором конечный хроматизм положения улучшает МПФ.

Возможность определения положительного или отрицательного влияния продольных хроматических aberrаций в параксиальной области зрачка на МПФ оптической системы обусловлена тем, что полихроматическая МПФ  $M(\nu)$  является абсолютным значением усредненных взвешенных монохроматических оптических передаточных функций. Поскольку в данной статье затрагиваются только рассуждения касательной осевой точки изображения, то в дальнейшем полагается, что значение полихроматической МПФ является усредненным взвешенным значением монохроматических МПФ  $M(\nu)_\lambda$ . Существующие методы компьютерного расчета оптических систем предполагают вычисление геометрических и интегральных характеристик с использованием дискретного набора длин волн. В наиболее распространенных пакетах расчета оптических систем количество длин волн ограничено 12–24. Для определения влияния отдельно сферической aberrации и хроматизма положения моделируется их влияние на монохроматические ФРТ точки системы и определяются монохроматические МПФ, взвешенные значения которых усредняются и сравниваются с дифракционной МПФ.

Хроматическое смещение плоскости изображения на определенной длине волны  $\lambda$  может быть представлено как расфокусировка монохроматической системы относительно ее плоскости параксиального изображения. Таким образом, исследование одной полихроматической системы с  $n$  длинами волн равнозначно исследованию  $n$  систем с одной длиной волны. Исследование осевой точки изображения в осесимметричной системе упрощается в силу того, что на ее размытие оказывает влияние только расфокусировка и сферическая aberrация.

Методика определения влияния продольных хроматических aberrаций в параксиальной области зрачка заключается в моделировании методами компьютерной оптики  $n$  мо-

нохроматических систем, в основе которых лежат две поверхности: идеальная поверхность с параксиальными свойствами первого порядка, заимствованными от оригинальной оптической системы, и поверхность, деформирующая волновой фронт с помощью стандартных коэффициентов Цернике [12, 13]. Использование стандартных коэффициентов Цернике позволяет смоделировать параксиальную линзу с волновой aberrацией  $W(\rho, \theta)$ , эквивалентной таковой в реальной системе в точке выходного зрачка с полярными координатами  $\rho, \theta$ . Изменяя коэффициент  $Z_4$ , отвечающий за расфокусировку в каждой из  $n$  смоделированных систем, моделируется случай, когда продольные хроматические aberrации в параксиальной области зрачка равны нулю, или, возвращаясь к дискретному представлению полихроматической системы, хроматизм положения системы равен нулю.

Из теории формирования изображения известно выражение для нормированной ФРТ осесимметричной системы с волновой aberrацией  $W(\rho, \theta)$  [14]:

$$E_\lambda(r) = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} e^{i \frac{2\pi}{\lambda} W(\rho, \theta)} \rho \, d\rho d\theta \right|^2, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от центра изображения, мм.

Сечение ФРТ одинаково в любом исследуемом направлении, перпендикулярном оптической оси, поскольку в случае осесимметричной оптической системы распределение энергии в изображении точки предмета, расположенной на оси системы, осесимметрично. Переход от монохроматической двумерной ФРТ к монохроматической двумерной МПФ с пространственными частотами  $v_x, v_y$  математически осуществляется через модуль прямого Фурье преобразования ФРТ

$$M(v)_\lambda = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_\lambda(r) e^{-i2\pi(v_x x + v_y y)} dx dy \right|. \quad (2)$$

В общем случае, когда длины волны системы имеют те или иные весовые коэффициенты  $w_i$ , полихроматическая МПФ осевой точки изображения может быть определена как средневзвешенные монохроматические МПФ:

$$M_{\Delta\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\lambda_i} \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}. \quad (3)$$

На практике возможны два случая: когда весовые коэффициенты в выражении (3) принимают равными единице и когда с целью увеличения точности расчета принимают равными произведению относительных спектральных коэффициентов пропускания системы, спектральной квантовой эффективности приемника излучений и спектральной излучательной способности объекта.

### Примеры из инженерной практики

Рассмотрим на примере телевизионного объектива с фокусным расстоянием 25 мм, относительным отверстием  $1 : K = 1 : 1,8$ , работающим в расширенном спектральном диапазоне от 0,45 до 0,9 мкм и имеющим угловое поле в пространстве предметов 33,7 градусов. Применение фтористого кальция и материалов с аномальной дисперсией наряду с классическими стеклами позволяет достичь характера коррекции, приближенного к апохроматическому в расширенном спектральном диапазоне оптической системы объектива; график МПФ и график хроматизма положения приведены на рис. 1, где М – МПФ в меридиональном сечении, С – МПФ в сагиттальном.

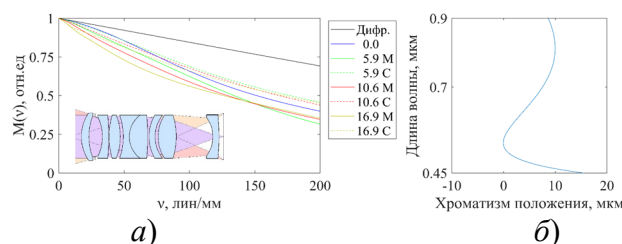


Рис. 1. Графики характеристик: а) МПФ; б) хроматизм положения

Экспортируя набор стандартных фазовых коэффициентов Цернике в параксиальную модель объектива, моделируется aberrированный волновой фронт, формирующий осевую точку изображения. На рис. 2 приведены графики исходных и скомпенсированных продольных хроматических aberrаций соответственно.

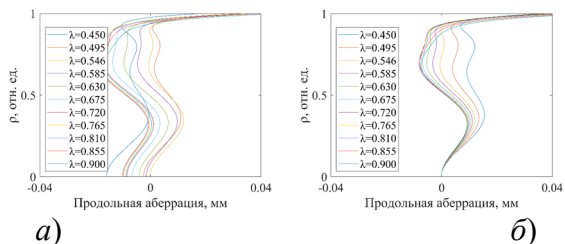


Рис. 2. Продольные aberrации: а) исходные; б) скомпенсированные

Графики на рис. 2, б получены путем оптимизации коэффициента  $Z_4$  стандартной фазовой поверхности Цернике. Определяя волновую aberrацию методами компьютерной оптики и последовательно используя выражения (2) и (3), осуществляется переход от исходной и скорректированной волновой aberrации к ФРТ и МПФ систем. Графики монохроматических составляющих исходной и скомпенсированной систем, а также график усредненных полихроматических значений МПФ, приведены на рис. 3.

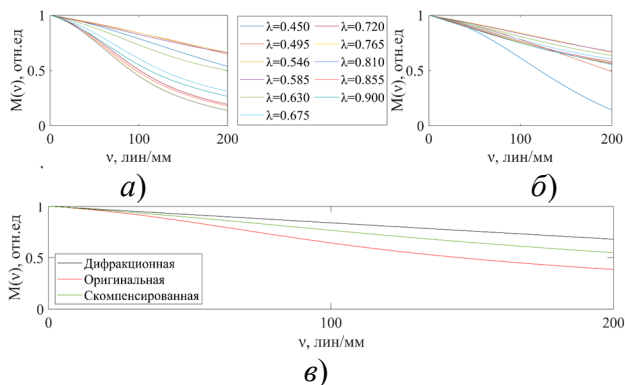


Рис. 3. Графики МПФ: а) монохроматический, с учетом хроматизма; б) монохроматический, со скомпенсированным хроматизмом; в) полихроматический

Из рис. 3, в следует, что разрешение, даваемое объективом со скомпенсированным хроматизмом положения, выше, чем разрешение исходной оптической систем, а значит, в данном случае влияние хроматизма положения соответствует классическому представлению о негативном влиянии aberrаций в оптической системе, а именно: наличие хроматизма положения негативным образом сказывается на разрешении оптической системы, снижая

значения МПФ в рабочем диапазоне пространственных частот.

Второй пример из инженерной практики иллюстрирует иную ситуацию. На рис. 4 приводится график МПФ, ход лучей и график хроматизма положения оптической системы тепловизионного объектива для спектрального диапазона от 8 до 12 мкм с фокусным расстоянием 12,4 мм, относительным отверстием 1 : 1, угловым полем зрения 105 градусов [15].

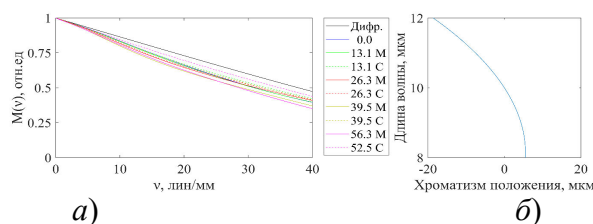


Рис. 4. Графики характеристик: а) МПФ; б) хроматизм положения

Поскольку при сопоставимых относительных отверстиях в инфракрасном объективе влияние дифракции на порядок выше по сравнению с объективом, рассмотренным в первом инженерном примере, то для обеспечения дифракционно ограниченного качества изображения в нем обеспечивается уровень коррекции aberrаций, соразмерный с дифракционными явлениями. Удвоенное значение осевого дифракционного предела разрешения объектива, определяемое как  $4\lambda n/K^2$ , выступает в роли первичного ориентировочного критерия для уменьшения значения хроматизма положения. Поскольку плоскость изображения исследуемого объектива смещена относительно своего параксиального изображения в плоскость наилучшей установки, то компенсация осевых продольных хроматических aberrаций, представленных на рис. 5, осуществляется именно в этой плоскости.

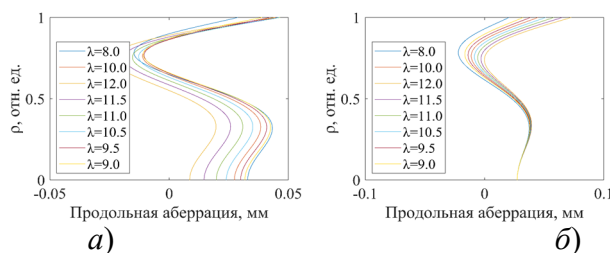


Рис. 5. Продольные aberrации: а) исходные; б) скомпенсированные

Вновь переходя к графикам МПФ, представленным на рис. 6, а, можно отметить сбалансированный вид графика, который, по-видимому, предпочтительней. Сравнивая графики МПФ оригинальной и скомпенсированной систем, представленные на рис 6, в, отмечается следующее: если в рассматриваемой системе уменьшить или вообще устранить до

нуля хроматизм положения по сравнению с имеющимся, то МПФ не возрастет, а наоборот, станет несколько ниже. Значение остаточного хроматизма в рассматриваемом примере составляет 24 мкм, что сопоставимо с уровнем  $2\lambda l/K^2$ . Таким образом, наличие остаточного хроматизма положения в этом примере благотворно сказывается на МПФ.

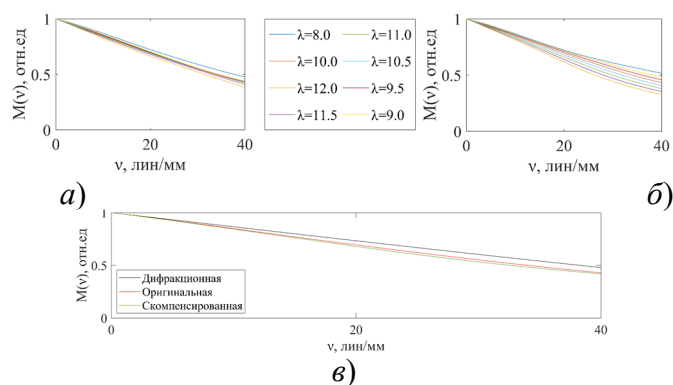


Рис. 6. Графики МПФ оптической системы: а) монохроматические до компенсации; б) монохроматические после компенсации; в) полихроматические

Можно предположить, что в случаях, когда конечной целью является достижение лучших значений МПФ, целесообразно проводить компьютерную оптимизацию волновых aberrаций оптической системы с возможностью замены материалов таким образом, чтобы хроматизм положения выступал балансирующим фактором продольных aberrаций оптической системы. Целевые значения для хроматических aberrаций, определяющие подбор материалов оптической системы и оптические силы компонентов, могут отличаться от нуля и представляют дополнительный инженерный интерес.

### Заключение

Автоматизировав вычисление МПФ реального объектива в соответствии с предложенной методикой по формулам (1)–(3), инженер способен сделать суждение о роли те-

кущего характера и значений хроматизма положения в балансировке aberrаций осевой точки изображения и при необходимости перейти на предыдущий или следующий этап синтеза оптической системы. Графики продольных aberrаций, представленные на рис. 2 и 5, являются промежуточными результатами работы алгоритма и приводятся для верификации предложенной методики оценки влияния хроматизма положения на МПФ (частотно-контрастную характеристику) разрабатываемого объектива. На двух примерах из инженерной практики показано, что возможно как отрицательное, так и положительное влияние хроматизма положения на МПФ осевой точки изображения. В последнем случае достигается балансировка остаточного хроматизма положения со сферохроматической aberrацией в изображении осевой точки в осесимметричной оптической системе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Часть 5. Абerrации и качество изображения : учебное пособие. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. 125 с.
2. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н. Об оценке влияния местных деформаций волнового фронта на качество оптического изображения. Оптика и спектроскопия. 1974. Вып. 4 (37). С. 792–797.

3. Vijay Kumar Gowda B. N., Gauni S., Maik V. Diffraction based image synthesis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Вып. 1 (1964). С. 1–9. DOI 10.1088/1742-6596/1964/6/062013.
4. Li Q., Shao X. Spherical aberration and modulation transfer function. *Proc. SPIE 9124, Satellite Data Compression, Communications, and Processing* : материалы Международной научно-практической конференции (22 мая 2014). С. 91241B-1–91241B-8. DOI 10.1117/12.2052671.
5. Gross H., Zügge H., Peschka M., Blechinger F. Image Quality Criteria. *Handbook of Optical Systems: Volume 3: Aberration Theory and Correction of Optical Systems* / под ред. H. Gross. Weinheim, 2007. Гл. 30. С. 71–211.
6. King W. B. Use of the Modulation-Transfer Function (MTF) as an Aberration-Balancing Merit Function in Automatic Lens Design. *Journal of the Optical Society of America*. 1969. 9 (59). С. 1155–1158. DOI 10.1364/JOSA.59.001155.
7. Tiziani H. The use of optical transfer function for assessing the quality of optical systems. *Photogrammetria*. 1978. Вып. 2 (34). С. 45–68. DOI /doi.org/10.1016/0031-8663(78)90015-7.
8. Dube B., Cicala R., Closz A., Rolland J. P. How good is your lens? Assessing performance with MTF full-field displays. *Applied Optics*. 2017. Вып. 20 (56). С. 5661–5667. DOI 10.1364/AO.56.005661.
9. Vijay Kumar Gowda B. N., Gauni S., Gurushankar K., Maik V. Application in optical design: Optimization for high intensity and aberration free camera lens system. *Optik*. 2022. Вып. 4 (262). С. 168764. DOI 10.1016/j.ijleo.2022.168764.
10. Иванова Т. В., Анощенков Д. И. Анализ возможных распределений координат реальных лучей на входном зрачке оптической системы при аппроксимации волновой аберрации полиномами Цернике. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Вып. 1 (18). С. 9–14. DOI 10.17586/2226-1494-2018-18-1-9-14.
11. Родионов С. А. Автоматизация проектирования оптических систем : учебное пособие для приборостроительных вузов. Л. : Машиностроение, 1982. 270 с.
12. Бездидько С. Н., Ровенская Т. С. Полиномы Цернике в проектировании оптических систем : учебное пособие. Ч. 1. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 44 с.
13. Bezdidko S. N. Orthogonal aberrations: theory, methods, and practical applications in computational optics. *Journal of Optical Technology*. Вып. 6 (83). 2016. С. 351–359. DOI 10.1364/JOT.83.000351.
14. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику / под ред. Г. И. Косоурова; пер. с англ. В. Ю. Галицкий, М. П. Головей. М. : МИР, 1970. 364 с.
15. Сверхширокоугольный светосильный ретрофокусный атермальный инфракрасный объектив : пат. 2837522 Рос. Федерация, № 2024134577, заявл. 19.11.2024; опубл. 31.03.2025; Бюл. № 10.

## REFERENCES

1. Kirillovskiy, V. K., Tochilina T. V. (2012). *Opticheskie izmereniya. Chast 5. Aberracii i kachestvo izobrazheniya : uchebnoe posobie [Optical Measurements. Part 5. Aberrations and Image Quality]*. SPb: NIU ITMO Publ., 125 p. [in Russian].
2. Zverev, V. A., Rodionov, S. A., Sokolskiy, M. N. (1974). On the assessment of the influence of local wave front deformations on the quality of an optical image. *Optika i spektroskopiya [Optics and spectroscopy]*, 4(37), 792–797 [in Russian].
3. B. N. Vijay Kumar Gowda, S. Gauni and V. Maik (2021). Diffraction based image synthesis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1(1964). P. 1–9. DOI 10.1088/1742-6596/1964/6/062013.
4. Q. Li, X. Shao (2014). Spherical aberration and modulation transfer function. *Proceedings of the Conference. SPIE 9124, Satellite Data Compression, Communications, and Processing* (22 may 2014). (pp. 91241B-1–91241B-8). DOI 10.1117/12.2052671.
5. Gross, H., Zügge, H., Peschka, M., Blechinger, F. (2007). *Image Quality Criteria Handbook of Optical Systems: Volume 3: Aberration Theory and Correction of Optical Systems* (pp. 71–211). Weinheim: WILEY-VCH Publ.

6. King, W. B. (1969). Use of the Modulation-Transfer Function (MTF) as an Aberration-Balancing Merit Function in Automatic Lens Design. *Journal of the Optical Society of America*, 9(59), 1155–1158. DOI 10.1364/JOSA.59.001155.
7. Tiziani, H. (1978). The use of optical transfer function for assessing the quality of optical systems. *Photogrammetria*, 2(34), 45–68. DOI /doi.org/10.1016/0031-8663(78)90015-7.
8. Dube, B., Cicala, R., Cloz, A., Rolland, J. P. (2017). How good is your lens? Assessing performance with MTF full-field displays. *Applied Optics*, 20(56), 5661–5667. DOI 10.1364/AO.56.005661.
9. Vijay Kumar Gowda B. N., Gauni S., Gurushankar K., Maik V. (2022). Application in optical design: Optimization for high intensity and aberration free camera lens system. *Optik*, 4(262), P. 168764. DOI 10.1016/j.ijleo.2022.168764.
10. Ivanova, T. V. Anoshenkov, D. I. (2018). Analysis of possible distributions of coordinates of real rays on the entrance pupil of an optical system when approximating wave aberration by Zernike polynomials. Analysis of possible distributions of coordinates of real rays on the entrance pupil of an optical system when approximating wave aberration by Zernike polynomials. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 1(18), 9–14. DOI 10.17586/2226-1494-2018-18-1-9-14 [in Russian].
11. Rodionov, S. A. (1982). *Avtomatizatsiya proyektirovaniya opticheskikh system* [Automation of design of optical systems]. Leningrad: Mashinostroenie, 270 p. [in Russian].
12. Bezdidko, S. N., Rovenskaya, T. S. (2006). *Polinomy Tsernike v proyektirovanii opticheskikh system* [Zernike polynomials in optical system design]. Moscow: MGTU Publ., 44 p. [in Russian].
13. Bezdidko, S. N. (2016). Orthogonal aberrations: theory, methods, and practical applications in computational optics. *Journal of Optical Technology*, 6(83), 351–359. DOI 10.1364/JOT.83.000351
14. Goodman J. (1970). *Vvedenie v Fur'e-optiku* [Introduction to Fourier Optics]. Moscow: MIR Publ., 364 p. [in Russian].
15. Khastevich, T. N., Eliseeva, A. A. *Patent RF No. 2837522*, Novosibirsk: IP Russian Federation.

### Об авторах

*Евгений Владимирович Шмелев* – аспирант кафедры фотоники и приборостроения СГУГиТ; инженер-конструктор ООО «Оптическое Расчетное Бюро».

*Татьяна Николаевна Хацевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения СГУГиТ; генеральный директор ООО «Оптическое Расчетное Бюро».

### Author details

*Evgenii V. Shmelev* – Ph. D. Student, Department of Photonics and Instrumentation; Engineer, Optical Design Office, LLC.

*Tatiana N. Khatsevich* – Ph. D., Professor, Department of Photonics and Instrumentation; Director General, Optical Design Office, LLC.

Получено / Received 30.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.09.2025

Принята к публикации / Accepted 19.09.2025