

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590

УДК 681.7.067.223.2

Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра

Михаил Петрович Поляков¹, Демид Денисович Хохлов^{2✉},
Алексей Александрович Быков³

^{1,2,3} Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация

¹ polyakov.mp@ntcup.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>

² khokhlov.dd@ntcup.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>

³ bykov@ntcup.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>

Аннотация

Введение. Широкое распространение спектральных и гиперспектральных методов в различных областях науки и техники требует все более высоких показателей оптического качества спектральных систем. В особенности актуальна задача повышения качества изображения для гиперспектральных систем, использующихся в методах видеоспектрометрии, так как достоверность восстановления спектральных характеристик исследуемых объектов зависит не только от диспергирующего элемента, но и от хроматических и монохроматических аберраций оптической системы. Недостаточная степень коррекции хроматических аберраций приводит к необходимости использовать в спектральной системе дополнительные программные и аппаратные средства для достоверного восстановления спектральных характеристик исследуемых объектов. Важным направлением разработки спектральных систем является поиск комбинаций марок стекол и архитектур оптических схем, которые позволяют решить вышеуказанные проблемы. В рамках исследования рассмотрены существующие методы проектирования оптических систем объективов-апохроматов, поставлена и решена задача создания архитектуры оптической схемы с минимально возможным набором марок стекол, которая лишена хроматических аберраций и позволяет получать высокое качество изображения. **Метод.** В работе использованы общизвестные методы расчета оптических схем на основе дисперсионных свойств стекла и композиции оптических систем профессора М.М. Русинова. Предварительный теоретический расчет оптической системы обеспечил формирование начальной конфигурации оптической схемы и выбор марок стекол. Оптимизация и анализ оптической системы выполнены с использованием системы автоматизированного проектирования Zemax. В ходе оптимизации начальной конфигурации оптической схемы без изменения марок стекол достигнута коррекция хроматических аберраций в диапазоне, значительно превосходящем по ширине величину, определенную при теоретическом расчете. **Основные результаты.** Рассчитана оптическая схема объектива с дифракционной степенью коррекции хроматических аберраций в широком диапазоне длин волн (0,5–2,3 мкм). Монохроматические аберрации объектива также исправлены с высокой степенью коррекции во всем рабочем спектральном диапазоне. По качеству изображения объектив является апохроматом. Конструкция объектива технологична и включает шесть линз (без асферических поверхностей) из двух марок стекол (каталог Лыткаринского завода оптического стекла). **Обсуждение.** Архитектура рассчитанной оптической схемы может быть использована как базовая при проектировании изображающих приборов спектрального анализа (гиперспектральные и мультиспектральные камеры).

Ключевые слова

объектив-апохромат, изображающая спектральная система, видеоспектрометрия, гиперспектральные и мультиспектральные камеры, коррекция хроматизма, аберрационная коррекция, качество изображения, архитектура оптической системы

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10239 (<https://rscf.ru/project/24-79-10239/>).

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) (НТИРФ ID: 456451, <https://ckp.ntcup.ru/>).

© Поляков М.П., Хохлов Д.Д. Быков А.А., 2025

Ссылка для цитирования: Поляков М.П., Хохлов Д.Д. Быков А.А. Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 585–590. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590

Apochromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges

Mikhail P. Poliakov¹, Demid D. Khokhlov², Alexey A. Bykov³

1,2,3 Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation

¹ polyakov.mp@ntcup.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>

² khokhlov.dd@ntcup.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>

³ bykov@ntcup.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>

Abstract

The widespread use of spectral and hyperspectral methods across various scientific and technological fields necessitates increasingly higher optical quality of spectral systems. The challenge of enhancing image quality for hyperspectral systems employed in imaging spectrometry methods is particularly significant. The reliability of reconstructing the spectral characteristics of research objects depends not only on the dispersing element but also on the chromatic and monochromatic aberrations of the optical system. Insufficient correction of chromatic aberrations necessitates the use of additional software and hardware within the spectral system for reliable reconstruction of the spectral characteristics of research objects. Consequently, a crucial aspect of spectral systems development involves finding optimal combinations of glass types and optical scheme architectures to address these issues. The authors examined existing methods for designing optical systems of apochromatic objectives and set and solved the problem of designing the architecture of an optical scheme with the minimum possible set of glass types which is free of chromatic aberrations and allows obtaining high image quality. The study employs well-established methods for computing optical schemes based on the dispersion properties of glass and the composition of optical systems as outlined by M.M. Rusinov. Preliminary theoretical calculation of the optical design provided the initial configuration of the optical scheme and the choice of glass types. Optimization and analysis of the optical system are performed in Zemax CAD. During the optimization of the initial configuration without changing the glass types; correction of chromatic aberrations was achieved in a range significantly exceeding the width determined in the theoretical calculation. An optical scheme of an objective with diffraction-limited correction of chromatic aberrations across a broad wavelength range (0.5–2.3 μ m) has been successfully developed. The objective exhibits well-corrected monochromatic aberrations across the entire operational spectral range and qualifies as an apochromat in terms of image quality. The objective design is technologically advanced, comprising six lenses (without aspherical surfaces) fabricated from two types of glass (LZOS catalog). The architecture of the developed optical scheme can serve as a foundation for designing imaging devices for spectral analysis applications, including hyperspectral and multispectral cameras.

Keywords

apochromatic objective, imaging spectral system, spectral imaging, hyperspectral and multispectral cameras, chromatic aberration correction, aberration correction, image quality, optical system architecture

Acknowledgments

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-79-10239 (<https://rscf.ru/project/24-79-10239/>).

This work was obtained using the equipment of the Core Shared Research Facility of Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS (STC UI RAS) (ID: 456451, <https://ckp.ntcup.ru/en/>).

For citation: Poliakov M.P., Khokhlov D.D., Bykov A.A. Apochromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 585–590 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590

Введение

Развитие спектральных методов, в том числе изображающей спектрометрии (видеоспектрометрии), и их широкое распространение в различных областях науки и техники [1–5] требует от спектральных систем все более высоких показателей оптического качества, а именно, пространственной и спектральной разрешающей способности. В изображающих спектральных системах достоверность восстанавливаемых по набору спектральных изображений спектральных характеристик зависит не только от свойств диспергирующего элемента, но и от хроматических aberrаций, вносимых

оптической системой. Наличие хроматизма положения в оптической системе влияет на качество изображения отдельных спектральных кадров и для достоверного восстановления спектральной характеристики требует перефокусировки на различных длинах волн. Наличие хроматизма увеличения и высших порядков хроматических aberrаций влияет на масштаб спектральных кадров в рабочем спектральном диапазоне и требует программной коррекции для достоверного восстановления спектральной характеристики исследуемых объектов. Таким образом, наличие в оптической системе хроматических aberrаций усложняет как саму спектральную систему, так и ее применение в различных задачах.

Исходя из этого, важным направлением разработки спектральных систем, позволяющим расширить возможности применения спектральных методов, является создание оптических систем с минимизированными хроматическими аберрациями и обладающих близким к дифракционному качеством изображения, что позволит им работать в широком спектральном диапазоне без использования дополнительных средств программной и аппаратной коррекции. Одновременно с этим, немаловажным критерием качества оптических систем, использующихся в составе многоканальной спектральной аппаратуры, является их технологичность. Расширение спектрального рабочего диапазона без существенного усложнения конструкции оптической схемы обеспечивает возможность унификации оптических систем отдельных каналов.

Расчет оптической системы объектива

Известны объективы-апохроматы [6–12] и гиперапохроматы¹, обладающие великолепными оптическими характеристиками в широком диапазоне длин волн. Цель настоящей работы — попытка улучшить известные оптические схемы объективов апохроматов для их применения в задачах мультиспектральной съемки и последующего термографирования производственных процессов металлообработки с использованием математической обработки получаемых спектральных изображений. Однако расчет оптической системы привел к интересному результату.

Алгоритм расчета предложенной базовой оптической схемы включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Подбор оптических материалов, обеспечивающих достаточную степень коррекции хроматических аберраций.

Этап 2. Формирование отправной точки для последующей оптимизации оптической системы, а именно, расположение компонентов в соответствии с принципами композиции оптических систем профессора М.М. Русинова.

Этап 3. Анализ качества изображения и оптимизация конструктивных параметров оптической системы (при необходимости проводится несколько итераций до получения приемлемых показателей качества изображения) при сохранении неизменными характеристик оптических материалов, выбранных на этапе 1.

Возможность коррекции хроматических аберраций определяется дисперсионными свойствами стекла, поэтому на этапе 1 расчета оптической системы важно выбрать марки стекол. Изначально подбор марок стекол производился для удовлетворяющей коррекции хроматических аберраций в диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм для работы с матричными приемниками излучения (МПИ) на основе кремния по следующим формулам [13–15]:

¹ Гиперапохроматические объективы диапазона 0,4–1,7 мкм фирмы Computar, Япония [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://computarganz.s3.us-east-1.amazonaws.com/Computar+Active+Resources/VISWIR_01.24.2024+V1.0+.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

$$\sum_{i=1}^N \phi_i h_i = 1, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\phi_i h_i}{v_i} = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\phi_i h_i^2 \gamma_i}{v_i} = 0, \quad (3)$$

где i — номер компонента; N — количество используемых марок стекол; $\phi_i = \frac{v_i}{v_i - v_{i-1}}$ и $\phi_i = \frac{v_i}{v_i - v_{i+1}}$ — относительная оптическая сила для четных и нечетных i соответственно; h_i — высота первого вспомогательного луча; $v_i = \frac{n_{1i} - 1}{n_{2i} - n_{3i}}$ — коэффициент дисперсии Аббе; $\gamma_i = \frac{n_{1i} - n_{3i}}{n_{2i} - n_{3i}}$ — относительная частная дисперсия для первой $n_{2i} - n_{3i}$ и третьей длин волн из выбранного диапазона.

Первая сумма (1) обеспечивает выполнение условия масштаба рассчитываемой оптической системы, вторая (2) и третья (3) суммы обеспечивают условие устранения хроматических аберраций — хроматизма положения и вторичного спектра, соответственно. Составив систему уравнений из уравнений (1)–(3) можно определить наиболее подходящие марки стекол, обеспечивающие необходимую степень коррекции хроматических аберраций.

Решения системы уравнений подбирались по критерию минимизации суммы модулей оптических сил компонентов рассчитываемого объектива и минимальному набору марок стекол, что обеспечивает повышенные коррекционные возможности и технологичность будущей оптической системы:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N |\phi_i| \rightarrow \min.$$

Вычисления производились с помощью программы, написанной в среде MATLAB. Решения системы уравнений были найдены уже для двух марок стекол из каталога Лыткаринского завода оптического стекла, которые при дальнейших расчетах не подвергались изменениям. Последующий расчет и оптимизация оптической системы проводились в системе автоматизированного проектирования (САПР) Zemax. Значения оптических сил отдельных компонентов, найденные из системы уравнений, были слишком большими, что усложнило бы аберрационную коррекцию, поэтому при расчете оптической системы в САПР Zemax каждый компонент был разделен на три линзы. Упрощение и ускорение поиска локального минимума оценочной функции при предварительной локальной оптимизации было обеспечено расположением линз и апертурной диафрагмы оптической системы в соответствии с принципами композиции оптических систем профессора М.М. Русинова [16]. После предварительной локальной оптимизации был введен хроматический радиус и проведена еще одна итерация оптимизации с поиском локального минимума оценочной функции. Последующий анализ оптической системы показал, что ее коррекционные возможности в части устранения хроматических аберраций куда шире, чем предполагалось.

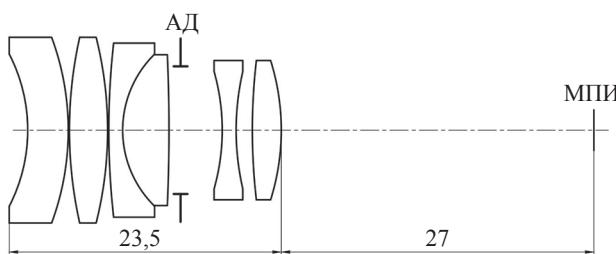


Рис. 1. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива.

АД — апертурная диафрагма; МПИ — фоточувствительная плоскость матричного приемника излучения

Fig. 1. The optical scheme architecture of the designed objective.

АД — aperture diaphragm; МПИ — photosensitive surface of the image sensor

лось. Потому была проведена глобальная оптимизация в существенно более широком диапазоне длин волн от 0,5 до 2,3 мкм, который позволяет использовать предложенную оптическую систему в комбинации как с кремниевыми МПИ, так и с МПИ на основе InGaAs. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива представлена на рис. 1.

Анализ качества изображения оптической системы объектива

Рассчитанный объектив предлагается использовать в спектральных системах с МПИ, поэтому, кроме хроматических aberrаций оптической системы, анализу также подлежат показатели качества монохроматических aberrаций на отдельных длинах волн.

При анализе оптической системы рассчитанного объектива было установлено, что в результате глобальной оптимизации был устранен третичный спектр (рис. 2), улучшена коррекция хроматизма увеличения для спектрального диапазона от 0,5 до 2,3 мкм (рис. 3),

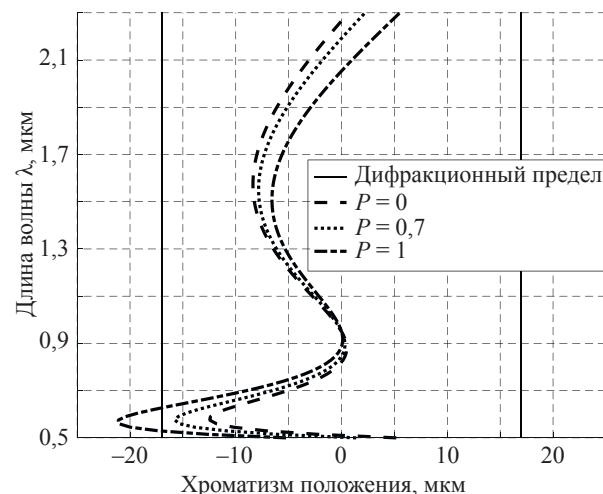


Рис. 2. Хроматизм положения для различных относительных координат зрачка P

Fig. 2. Chromatic focal shift for different pupil coordinates in arbitrary units

полихроматическая модуляционная передаточная функция близка к дифракционной (рис. 4), а также улучшена коррекция монохроматических aberrаций в указанном диапазоне длин волн (рис. 5)¹.

Таким образом, хроматические aberrации устранины с дифракционным качеством, а монохроматические aberrации устранины с близким к дифракционному качеством во всем диапазоне длин волн. Получены основные технические характеристики рассчитанного объектива: рабочий спектральный диапазон — 0,5–2,3 мкм; относительное отверстие — 1:3; фокусное расстояние — 35 мм; линейное поле изображения (размер МПИ) — 4,2 × 3,5 мм; дисторсия — 0,1 %; виньетирование — отсутствует.

¹ Все характеристики приведены относительно основной длины волны $l = 0,95$ мкм.

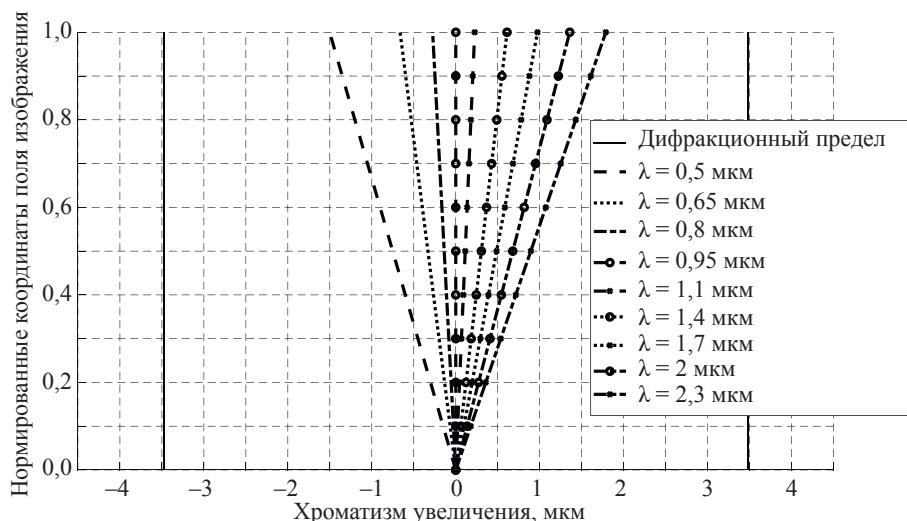
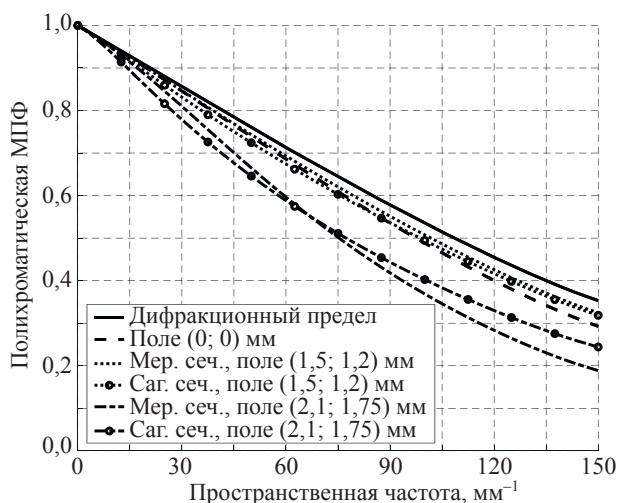


Рис. 3. Хроматизм увеличения для различных длин волн

Fig. 3. Lateral color for different wavelengths

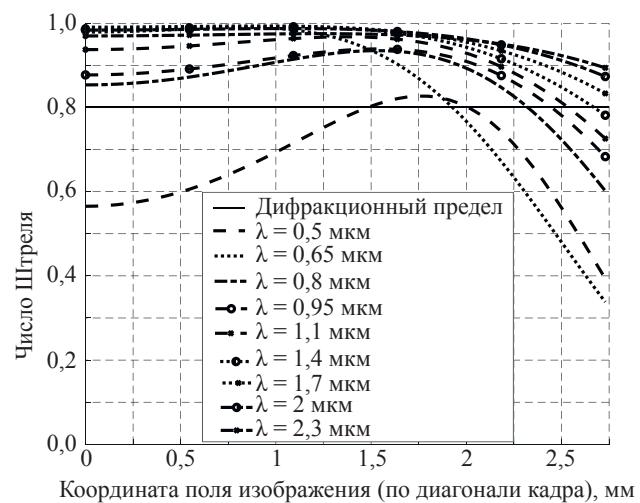


Rис. 4. Поляхроматическая модуляционная передаточная функция (МПФ) в меридиональном (мер. сеч.) и сагиттальном (саг. сеч.) сечениях для различных точек поля в координатах изображения

Fig. 4. Polychromatic modulation transfer function in tangential and sagittal cross-sections for different fields in image coordinates

Заключение

В работе спроектирован объектив, обладающий качеством изображения, близким к дифракционному, и практически лишенный хроматических aberrаций в очень широком диапазоне длин волн (0,5–2,3 мкм). Объектив может найти применение в спектральных



Rис. 5. Число Штреля для различных длин волн

Fig. 5. Strehl ratio for different wavelengths

системах любого типа, имеет высокую степень технологичности и унификации, так как содержит в себе всего шесть линз (без асферических поверхностей) из двух марок стекол. Разработанный объектив достаточно просто масштабируется на другие фокусные расстояния без потери качества изображения и степени коррекции хроматических aberrаций. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива может быть использована как базовая для расчета оптических систем с большими полями зрения и относительными отверстиями.

Литература

- Bhargava A., Sachdeva A., Sharma K., Alsharif M.H., Uthansakul P., Uthansakul M. Hyperspectral imaging and its applications: A review // *Heliyon*. 2024. V. 10. N 12. P. e33208. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208>
- Yoon J. Hyperspectral imaging for clinical applications // *BioChip Journal*. 2022. V. 16. N 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00041-0>
- Huang L., Luo R., Liu X., Hao X. Spectral imaging with deep learning // *Light: Science & Applications*. 2022. V. 11. N 1. P. 61. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00743-6>
- Gu Y., Liu T., Gao G., Ren G., Ma Y., Chanussot J., Jia X. Multimodal hyperspectral remote sensing: an overview and perspective // *Science China Information Sciences*. 2021. V. 64. N 2. P. 121301. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3084-1>
- Faltynkova A., Johnsen G., Wagner M. Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development // *Microplastics and Nanoplastics*. 2021. V. 1. N 1. P. 13. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00014-y>
- Поляков М.П., Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э. Унифицированная оптическая схема акустооптического видеоспектрометра видимого диапазона спектра // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 11. С. 62–70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-62-70>
- Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu S., Xu M. VIS-NIR superachromatic triplet design with five-color correction for a broadband interferometer // *Applied Optics*. 2022. V. 61. N 30. P. 8880–8888. <https://doi.org/10.1364/AO.465959>
- Чичаева О.В., Дмитерко Р.А., Страхов А.А. Суперапохромат для широкой области спектра. Патент RU2749179C1. 2021. (in Russian)
- Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives. *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 10, pp. 105106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106>

References

- Bhargava A., Sachdeva A., Sharma K., Alsharif M.H., Uthansakul P., Uthansakul M. Hyperspectral imaging and its applications: A review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. e33208. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208>
- Yoon J. Hyperspectral imaging for clinical applications. *BioChip Journal*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00041-0>
- Huang L., Luo R., Liu X., Hao X. Spectral imaging with deep learning. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 61. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00743-6>
- Gu Y., Liu T., Gao G., Ren G., Ma Y., Chanussot J., Jia X. Multimodal hyperspectral remote sensing: an overview and perspective. *Science China Information Sciences*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 121301. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3084-1>
- Faltynkova A., Johnsen G., Wagner M. Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 13. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00014-y>
- Poliakov M.P., Batshev V.I., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Unified optical scheme of an acousto-optical imaging spectrometer for the visible spectrum. *Journal of Optical Technology*, 2023, vol. 90, no. 11, pp. 674–678. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000674>
- Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu S., Xu M. VIS-NIR superachromatic triplet design with five-color correction for a broadband interferometer. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 30, pp. 8880–8888. <https://doi.org/10.1364/AO.465959>
- Chichaeva O.V., Dmiterko R.A., Strakhov A.A. Wide spectrum superapochromat. Patent RU2749179C1. 2021. (in Russian)
- Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives. *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 10, pp. 105106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106>

9. Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives // Optical Engineering. 2017. V. 56. N 10. P. 105106. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106>
10. Yang A., Gao X., Li M. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision // Applied Optics. 2016. V. 55. N 22. P. 5977–5985. <https://doi.org/10.1364/AO.55.005977>
11. Архипова Л.Н., Демидова Е.А., Понин О.В., Шаров А.А. Объективы-апохромат. Патент RU2611335C1. 2017. Бюл. № 6.
12. Архипов С.А., Кушнарев К.Г., Скляров С.Н. Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры // Контенант. 2014. Т. 15. № 1. С. 36–44.
13. Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчёт и автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 128 с.
14. Заварзин В.И., Кравченко С.О., Митрофанова Ю.С. Выбор оптических материалов для минимизации хроматизма положения в перспективной широкозахватной многоспектральной аппаратуре среднего разрешения // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 16–23. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593>
15. La Serna P.S., Revuelta J.S.C. Optical glass selection for color corrected broadband instrumentation: an overview // Applied Optics. 2022. V. 61. N 3. P. A50–A61. <https://doi.org/10.1364/AO.442126>
16. Русинов М.М. Композиция оптических систем. М.: ЛиброКом, 2021. 384 с.
10. Yang A., Gao X., Li M. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 22, pp. 5977–5985. <https://doi.org/10.1364/AO.55.005977>
11. Arkhipova L.N., Demidova E.A., Ponin O.V., Sharov A.A. Apochromat lens. *Patent RU2611335C1*. 2017. (in Russian)
12. Arkhipov S.A., Kushnarev K.G., Sklyarov S.N. Apochromatic lens for hyperspectral apparatus. *Contenant*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 36–44. (in Russian)
13. Grammatin A.P., Romanova G.E., Balatsenko O.N. *Calculation and Automation of Optical Systems Design*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 128 p. (in Russian)
14. Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Y.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 593–598. <https://doi.org/10.1364/jot.83.000593>
15. La Serna P.S., Revuelta J.S.C. Optical glass selection for color corrected broadband instrumentation: an overview. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 3, pp. A50–A61. <https://doi.org/10.1364/AO.442126>
16. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. Moscow, Librokom Publ., 2021, 384 p. (in Russian)

Авторы

Поляков Михаил Петрович — младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, [sc 59033553200](https://orcid.org/0009-0004-3484-6466), <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, polyakov.mp@ntcup.ru

Хохлов Денис Денисович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, [sc 57188552491](https://orcid.org/0000-0003-0919-7762), <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, khokhlov.dd@ntcup.ru

Быков Алексей Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, [sc 57203226784](https://orcid.org/0000-0002-7574-3437), <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, bykov@ntcup.ru

Authors

Mikhail P. Poliakov — Junior Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, [sc 59033553200](https://orcid.org/0009-0004-3484-6466), <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, polyakov.mp@ntcup.ru

Demid D. Khokhlov — PhD, Head of Laboratory, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, [sc 57188552491](https://orcid.org/0000-0003-0919-7762), <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, khokhlov.dd@ntcup.ru

Alexey A. Bykov — PhD, Scientific Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, [sc 57203226784](https://orcid.org/0000-0002-7574-3437), <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, bykov@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025

Одобрена после рецензирования 12.05.2025

Принята к печати 22.07.2025

Received 22.04.2025

Approved after reviewing 12.05.2025

Accepted 22.07.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»