

МОДИФИКАЦИЯ ДЛИННОФОКУСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБЪЕКТИВА «ТАИР» В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА

Р.С. Эшмаков

rodion.eshmakov
@chemistry.msu.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнена оптимизация оптической схемы длиннофокусного ахромата с менисковым корректором «Таир» ($F = 400$ мм, 1:4,5) с разделением трудоемкого в производстве мениска на две более простые в изготовлении линзы и заменой оптических материалов. Проведен анализ дисперсионных свойств оптических стекол из каталогов АО «ЛЗОС» (Россия) и CDGM (Китай), близких по параметрам к используемым в оптической схеме корректора «Таир». Установлено, что эти материалы и их комбинации дают возможность улучшения оптического качества исходного объектива. Исследовано влияние выбора материалов линз объектива «Таир» с использованием каталогов АО «ЛЗОС» и CDGM на степени исправления хроматических aberrаций и качество изображения, описываемое в терминах функции передачи модуляции для видимого диапазона длин волн. Проведено сравнение характеристик объективов, использующих как оригинальную оптическую схему, так и модифицированную с применением различных оптических материалов. Предложен вариант объектива типа «Таир» упрощенной конструкции, который обладает значительным превосходством оптических характеристик по сравнению с другими вариантами исполнения

Ключевые слова

Оптика, оптимизация, оптическая система, объектив, менисковый корректор, оптические материалы, разработка, длиннофокусные ахроматические системы

Поступила 18.03.2024

Принята 23.10.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. Простые по конструкции длиннофокусные ахроматические системы находят широкое применение в качестве объективов для наблюдательных приборов, фотоаппаратов и телескопов. Получившие распространение в силу простоты изготовления ахроматические двухлинзовые объективы имеют несколько недостатков, в том числе малое угловое поле

зрения, ограничиваемое астигматизмом и кривизной поля, что снижает качество изображения на оси хроматических аберраций.

Недостатки простых оптических систем с неисправленными астигматизмом и кривизной поля в значительной степени могут быть устранены использованием толстого концентрического менискового корректора. Этот корректор располагают в сходящемся пучке света между объективом и изображением так, что центр кривизны мениска совпадает с центром изображения, тем самым позволяя исправить кривизну поля тангенциальных пучков [1, 2]. В отличие от отрицательного корректора поля Смита (линза Смита) [1], менисковый корректор не приводит к существенному изменению угла главных лучей и позволяет обеспечить ненулевое заднее вершинное расстояние [3]. Трехлинзовый длиннофокусный объектив-анастигмат, называемый «Таир», состоящий из ахроматического дублета с тонким воздушным промежутком и расположенного на расстоянии от него менискового корректора, описан в [4]. В СССР подобный описанному в [4] объектив выпускался под названием «Таир-3» [5]. Объектив имеет общую длину 96 % фокусного расстояния, т. е. не относится к системам типа телеобъектива. Этот факт обеспечивает объективу преимущество в качестве изображения [6] по сравнению с близкими по технологическому уровню и сложности конструкции телеобъективами (например, [7, 8]) и паритет в оптическом качестве с более сложными системами [9].

Согласно данным работы [10], двухлинзовый объектив с менисковым корректором относится к локально оптимизируемому трехлинзовому объективу для малых углов полей зрения, причем минимум достигается при условиях, что оптическая сила мениска очень мала и он расположен как можно ближе к формируемому изображению. Отмечено, что среди прочих возможных вариантов комбинации мениска и дублета указанный вариант является наилучшим, значительно опережающим по оптическому качеству триплет Кука. Таким образом, объективы типа «Таир» являются наилучшим из простейших возможных решений анастигмата для малых углов полей зрения.

Однако близкие к концентрическим менисковые элементы, подобные менисковому корректору в объективе «Таир», являются сложными в производстве [11] вследствие необходимости удаления большого количества материала при обработке и затруднительности центрирования поверхностей друг относительно друга. Кроме того, дублет в объективе типа «Таир-3» имеет тонкий воздушный зазор, что также может быть проблемой при сборке. С момента расчета оригинальной схемы появились новые оптические материалы [12, 13], поэтому представляет интерес пересчет оптической

схемы объектива типа «Таир-3» в целях упрощения оригинальной конструкции и повышения качества изображения за счет применения современных преломляющих сред.

В связи с изложенным *цель работы* — привести результаты оптимизации оптической схемы длиннофокусного ахромата с менисковым корректором «Таир». Для выполнения поставленной цели определены следующие задачи: 1) поиск альтернативной конструкции менискового план-астигматического корректора для повышения технологичности и оптического качества системы; 2) анализ оптической схемы исходного объектива и выявление оптимальных материалов из числа современных стекол из каталогов АО «ЛЗОС» (Россия) и CDGM (Китай) для применения в объективе типа «Таир»; 3) оптимизация оптической схемы исходного объектива с применением новых оптических материалов, фиксацией параметров линз для повышения технологичности и сравнительный анализ оптических свойств найденных решений.

Материалы и методы. Моделирование оптических систем проводили в программном обеспечении *Zemax 13 SP4 64-bit*. Для оптимизации оптических систем использовали спектральную функцию, характеризующую чувствительность CMOS-матриц цифровых фотоаппаратов с байеровским RGB-фильтром [14] (табл. 1), и актуальные каталоги материалов АО «ЛЗОС» и CDGM.

Таблица 1

**Спектральная функция, характеризующая
CMOS-матрицы фотоаппаратов**

Длина волны, нм	Весовой коэффициент	Длина волны, нм	Весовой коэффициент
400	0,1	560	0,75
420	0,35	580	0,7
440	0,66	600	0,6
460	0,83	620	0,4
480	1,0	640	0,3
500		660	0,2
520		680	0,1
540		700	

В качестве начальной модели для выполнения расчетов использовали объектив типа «Таир-3» [4], масштабированный до фокусного расстояния $F = 400$ мм при заданном угле поля зрения $2\omega = 8,6^\circ$ и относительном

диаметре отверстия 1:4,5. Параметры оптической схемы объектива сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры оптической схемы объектива типа «Таир-3» ($F = 400$ мм, 1:4,5)

Номер поверхности	R , мм	Толщина, мм	Марка стекла	n_d	ν_d	Высота, мм
1	215,60	12	ТК16	1,613	58,14	46,7
2	-244,73	0,53	Воздух	–	–	46,5
3	-237,47	8	ТФ3	1,717	29,48	46,3
4	-2694,67	53,3	Воздух	–	–	45,3
5*	∞	106,7	Воздух			37,0
6	52,64	13,3	Ф1	1,613	36,88	27,4
7	44,81	189,4**	Воздух	–	–	24,0
*Апертурная диафрагма.						
**Расстояние до плоскости наилучшей установки (ПНУ) при относительном отверстии 1:4,5.						

В процессе оптимизации фокусное расстояние объектива оператором EFFL фиксировали равным 400 мм. Технологические ограничения, связанные с толщинами элементов и воздушных зазоров: 1) максимальная центральная толщина линз (MXCG) 16 мм, минимальная (MNCG) 3 мм; 2) минимальная толщина кромок линз (MNEG) 3 мм, воздушных зазоров между кромками линз (MNEA) 1 мм; 3) минимальный воздушный зазор на оси 0,5 мм. Приемлемая аксиальная длина системы линз принята равной не более 200 мм, полная длина системы — не более 400 мм. Виньетирование в процессе оптимизации не вводили.

В качестве оценочной функции применяли встроенную функцию оптимизации по ошибке волнового фронта (RMS wavefront) при разбиении зрачка на прямоугольный массив 12×12 точек. Для единообразия исправления сферохроматической аберрации с использованием оператора AXCL фиксировали ахроматизацию для длин волн 420 и 700 нм, при этом оператором LACL минимизировали поперечные хроматические аберрации для диапазона 400...700 нм. Контроль значений зейделевских монохроматических аберраций проводили операторами SPHA, FCUR, ASTI, COMA для длины волны 540 нм для того, чтобы исключить эффект взаимной компенсации сферической аберрации, астигматизма и кривизны поля — псевдосдвиг фокуса [15, 16], а также для упрощения контроля системы при оптимизации. Для повышения качества изображения в пределах

ПНУ применяли операторы геометрической функции передачи модуляции (GMTA, GMTT, GMTS) для значений частоты 10, 30 и 100 мм^{-1} .

Для оценки результатов оптимизации вычисляли функции передачи модуляции (ФПМ) на оптической оси для значений частоты $0...100 \text{ мм}^{-1}$ и по полю изображения для значений частоты 10 и 30 мм^{-1} , учитывали значения вторичного спектра для относительных отверстий 1:4,5 и 1:∞.

На первом этапе оптимизировали оригинальную трехлинзовую оптическую схему с применением близких к исходным параметрам марок оптического стекла АО «ЛЗОС» и CDGM при заданных выше условиях. На втором этапе менисковый корректор исходного объектива для повышения качества изображения и технологичности заменяли склеенным мениском, в котором одна линза является плосковыпуклой, а другая — плосковогнутой. При оптимизации получившейся четырехлинзовой системы материалы выбирали таким образом, чтобы обе линзы мениска были из разного стекла. Для упрощения системы поверхность отрицательной линзы переднего элемента задавали плоской и обращенной к изображению.

Результаты и обсуждение. *Разделение менискового корректора как способ повышения технологичности.* Идея исполнения менискового корректора в виде склеенного дублета для повышения качества объективов типа «Таир» известна. Так, в объективе «Таир-10» мениск представляет собой склеенный дублет, в котором одна линза имеет форму отрицательного мениска из стекла типа крон (К), а другая — форму положительного мениска из стекла типа кронфлинт (КФ) [5]. Такая модификация корректора ведет к снижению технологичности, поскольку обе его линзы имеют форму толстых менисков с поверхностями большой кривизны.

Разделение мениска объектива типа «Таир» на две линзы с плоскими поверхностями предъявляет определенные требования к параметрам материалов. Чтобы существовала возможность исправления сферохроматической аберрации объектива, обе линзы должны быть выполнены из материалов, имеющих близкие дисперсии. Показатель преломления также должен быть схож у каждого выбранного материала, поскольку менисковый корректор должен обладать близкой к нулю оптической силой при почти концентрической геометрии. Если дисперсия стекла положительной линзы мениска окажется меньше дисперсии стекла отрицательной линзы мениска, то оптимизация объектива приведет к длиннофокусному апланату, описанному в [6, 17].

Поиск современных преломляющих материалов для использования в объективах типа «Таир». Передний компонент объектива типа «Таир-3»

представляет собой ахроматический дублет с воздушным промежутком, в котором переисправлена продольная хроматическая aberrация и недоисправлена кривизна поля сагиттальных и тангенциальных пучков. В таком случае выбор материалов следует классическому принципу, согласно которому лучшая коррекция продольной хроматической aberrации достигается при использовании материалов с наибольшей разностью чисел Аббе крона положительной линзы и флинта отрицательной, и наименьшей разности относительных частных дисперсий для спектральных линий избранного рабочего диапазона длин волн. Показатель преломления материала положительной линзы должен быть несколько ниже, чем у стекла отрицательной, но достаточно высок — для исправления монохроматических aberrаций [6].

В объективе типа «Таир-3» материалом положительной линзы является тяжелый крон ТК16 615.581, которому в каталоге стекла АО «ЛЗОС» соответствуют тяжелые кроны ТК14 616.603 и ТК17 631.591, отличающиеся меньшей дисперсией, и лантановый крон СТК3 662.581 с более высоким показателем преломления (рис. 1). В каталоге CDGM можно найти значительно больше материалов, среди которых тяжелый крон Н-ZK9B 623.601, одновременно обладающий меньшей дисперсией и большим показателем преломления по сравнению с материалом ТК16. В отличие от каталога АО «ЛЗОС», среди стекол каталога CDGM есть тяжелые фосфатные кроны, например Н-ZPK2A 605.652 с существенно меньшей дисперсией по сравнению с тяжелыми кронами ($n_d \sim 1,6\text{--}1,62$), а также низкодисперсные лантановые кроны типа Н-LAK4L 643.600.

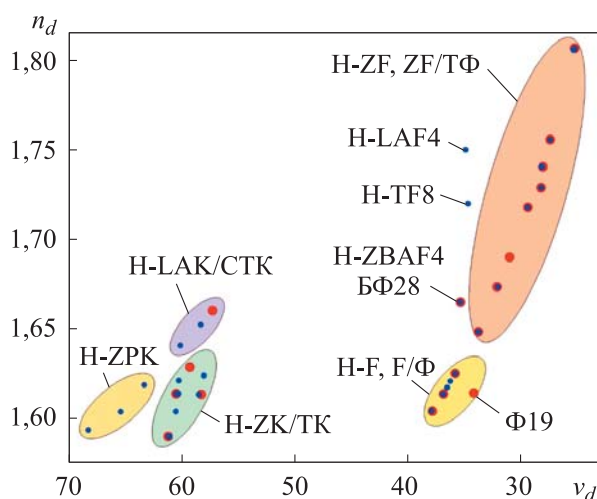


Рис. 1. Диаграмма Аббе избранных материалов CDGM (●) и АО «ЛЗОС» (●)

Кроме основных параметров материалов, также следует учитывать и значения относительной частной дисперсии P_{gF} , поскольку в длинно-фокусной системе вклад разности P_{gF} материалов положительной и отрицательной линз в коррекцию хроматизма может быть весьма весомым. Для тяжелых кронов АО «ЛЗОС» значения P_{gF} принадлежат так называемой нормальной прямой зависимости $P_{gF}(v_d)$ материала, которая в каталоге АО «ЛЗОС» определяется как линия, соединяющая точки, которые соответствуют стеклам К8 518.639 и Ф13 624.361 на диаграмме [4] (рис. 2). Многие тяжелые кроны CDGM, лантановые кроны CDGM и АО «ЛЗОС» имеют отрицательное отклонение $P_{gF}(\Delta P_{gF})$ от нормальной прямой, что невыгодно для коррекции хроматизма при использовании указанных материалов в положительных линзах. Тяжелые фосфатные кроны CDGM Н-ZPK обладают положительным отклонением от нормальной прямой, следовательно, их дисперсионные свойства способствуют снижению уровня продольного хроматизма [6, 12]. Таким образом, в случае доступности стекол из тяжелых фосфатных кронов их применение в положительной линзе объектива типа «Таир-3» предпочтительнее, в противном случае можно выбирать между тяжелыми кронами, лежащими на нормальной прямой.

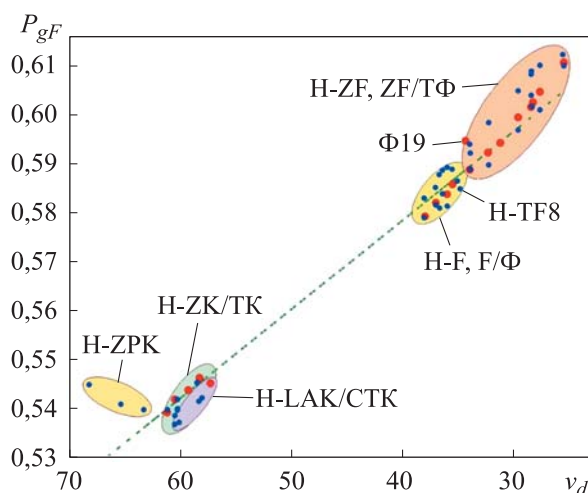


Рис. 2. Отклонение относительной частной дисперсии P_{gF} избранных материалов CDGM (●) и АО «ЛЗОС» (●) от нормальной прямой (---)

Выбор материала отрицательной линзы дублета в объективе типа «Таир-3» лежит среди стекол класса тяжелых флинтгов. В случае использования в качестве первой линзы тяжелого или лантанового крона необходи-

мо применение материалов с $\nu_d < 30$, среди которых в каталоге АО «ЛЗОС» можно отметить ТФ3 723.293, ТФ7 734.281, ТФ4 746.279 и ТФ5 762.273. Каждому материалу в каталоге CDGM можно найти альтернативный, причем в двух вариантах, различных по химическому составу: 1) традиционное свинцовое стекло серии ZF; 2) совместимое со стандартами RoHS стекло серии H-ZF, не содержащее свинца. При практически полностью одинаковых основных параметрах (см. рис. 1) стекла H-ZF, ZF и ТФ сильно различаются по относительной частной дисперсии P_{gF} : положительное отклонение бессвинцовых стекол от нормальной прямой значительно сильнее выражено, чем в случае свинцовых стекол (см. рис. 2), причем значение P_{gF} материалов ZF по сравнению со значением аналогичных стекол из каталога АО «ЛЗОС» оказывается зачастую заметно ниже, что делает стекла серии ZF предпочтительнее пары для тяжелого или лантанового крона. Отметим, что с ростом дисперсии тяжелых флинтов обоих типов положительное отклонение также возрастает, что означает существование оптимума при выборе материала, поскольку желание получения наибольшей разности дисперсий крона и флинта находится в противоречии с желанием иметь наименьшую разность относительных частных дисперсий P_{gF} крона и флинта.

Если в объективе типа «Таир-3» в качестве положительной линзы дублета используется низкодисперсный тяжелый фосфатный крон (например, H-ZPK5 595.680), то возможно применение стекол ТФ2 678.320 с $35 < \nu_d < 30$ или, что предпочтительнее, его аналога ZF2 678.319 с необычным для тяжелого флинта отрицательным отклонением от нормальной прямой, а также лантанового флинта H-LAF4 745.347 и особого флинта H-TF8 725.345, отличающегося $\Delta P_{gF} < 0$.

Слабоотрицательный менисковый корректор в объективе типа «Таир-3» изготовлен из флинта Ф1 617.367, для которого существует большое число возможных замен как в каталоге АО «ЛЗОС», так и в каталоге CDGM. Как показало оптическое моделирование, материал линзы должен иметь сравнительно высокую дисперсию и положительное отклонение P_{gF} от нормальной прямой. Это означает, что на замену подходит бессвинцовое стекло типа H-F1 607.377 или стекло типа Ф19 618.340.

В случае склеенного по плоскости из двух линз менискового корректора возможно применение комбинации стекол Ф19 и Ф4 629.357 из каталога АО «ЛЗОС». Основной трудностью подбора стекол является отсутствие материалов с похожими дисперсиями при сильно различающихся значениях P_{gF} в каталоге АО «ЛЗОС». Именно этот факт является причиной

отсутствия среди многочисленных отечественных вариантов объектива «Таир», у которого мениск разделен указанным образом: получающаяся положительная линза оказывается слишком сильной, чтобы переисправленный хроматизм переднего компонента смог это компенсировать. В результате этого применяли составной мениск, склеенный из слабого отрицательного мениска со стеклом с $\Delta P_{gF} < 0$ и низкой дисперсией и слабого положительного мениска, выполненного из стекла с меньшим значением числа Аббе на 10–15 и $\Delta P_{gF} > 0$ [5]. Отметим, что в упомянутом ранее объективе «Таир-10» оба применяемых в мениске стекла имеют близкий показатель преломления. Таким образом, изменение кривизны границы раздела позволяет в достаточно широких пределах менять эффективные дисперсии и относительную частную дисперсию P_{gF} , тем самым непрерывно контролируя исправление хроматической аберрации [18]. Кроме того, в системах типа склеенного триплета из линз с близкими значениями показателя преломления и различными дисперсиями можно добиться инверсного исправления вторичного спектра [19]. Однако для этого требуется широкий выбор материалов с разными значениями P_{gF} : в рассматриваемой системе в качестве материала положительных линз используются тяжелый крон Schott SK4 610.568 ($\Delta P_{gF} \sim 0$) и титановый флинт TIF6 610.310 ($\Delta P_{gF} \gg 0$), а в качестве материала отрицательной линзы — особый флинт KZFS1 609.443 ($\Delta P_{gF} \ll 0$). Менисковый корректор поля, состоящий из двух склеенных дублетов и подобный по способу исправления хроматической аберрации описанной системе, рассмотрен в [20].

Каталог стекол CDGM позволяет намного эффективнее по сравнению с каталогом АО «ЛЗОС» решить задачу поиска материалов для линз в рассматриваемом склеенном по плоской поверхности мениске за счет наличия двух линеек флинтов с сильно различающимися значениями P_{gF} при идентичных основных параметрах, причем флинты серии F каталога CDGM имеют меньшие значения P_{gF} . Вследствие этого большая разность относительных частных дисперсий P_{gF} достигается уже при использовании одинаковых по основным параметрам флинтов — бессвинцового в положительной линзе и свинцового в отрицательной. Исходя из соображений коррекции монохроматических аберраций это неоптимальное решение. Среди стекол каталога CDGM представляют интерес комбинации H-F3 621.364 и F1 607.378, H-ZBAF4 669.352 и F3 621.364, H-F5 629.357 и F3, H-ZF2 678.319 и ZF1 652.356. Отметим, что из перечисленных пар материалов нет специальных дорогостоящих стекол.

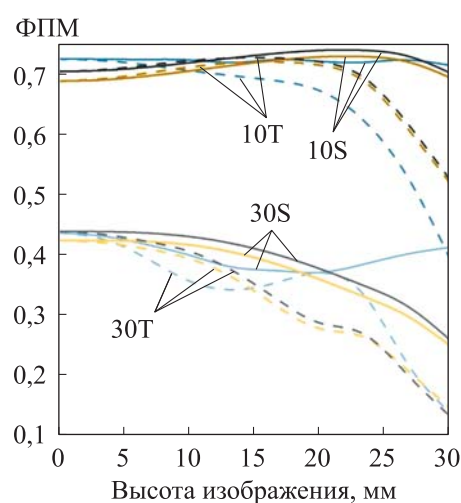
Оптимизация исходной трехлинзовой системы с использованием тяжелых кронов АО «ЛЗОС» и CDGM. Исходный объектив типа «Таир-3» оптимизирован при описанных выше условиях в целях замены оптических материалов более актуальными, изменения диапазона длин волн ахроматизации и увеличения воздушного зазора в дублете. Из каталога АО «ЛЗОС» для замены стекол ТК16, ТФ3 и Ф1 выбраны ТК14, ТФ4 и Ф6 607.377, а из каталога CDGM — Н-ZK9B, ZF5 и Н-F1 607.377. Согласно данным табл. 3 (рис. 3), вариант с использованием материалов из каталога CDGM оказался значительно лучше по оптическому качеству по сравнению с вариантами из каталога АО «ЛЗОС».

Таблица 3

Характеристики исходного и оптимизированных объективов типа «Таир-3»

Объектив	Марка стекла	Вторичный спектр, мкм		ФПМ, $y' = 0$		Частота при ФПМ = 0,3, $y' = 0$	Общая длина системы	Длина линзовой системы (осевая)
		1:4,5	1:∞	10 мм ⁻¹	30 мм ⁻¹			
«Таир-3» 400 мм, 1:4,5	ТК16 / ТФ3 / Ф1	1994	1249	0,72	0,44	54	383	194
«Таир» (АО «ЛЗОС»)	ТК14 / ТФ4 / Ф6	1564	1241	0,68	0,43	55	385	192
«Таир» (CDGM)	Н-ZK9B / ZF5 / Н-F1	1529	1213	0,69	0,44	59	384	180

Рис. 3. Кривые ФПМ для исходного объектива типа «Таир-3» (кривые голубого цвета) и для оптимизированных вариантов («Таир» (АО «ЛЗОС») кривые желтого цвета, «Таир» (CDGM) кривые серого цвета) при частоте 10 и 30 мм⁻¹ для тангенциальных (Т) и сагиттальных (S) направлений



Причина наблюдаемой разности заключается в дисперсионных свойствах флинтв CDGM: в результате повторной оптимизации при замене в объективе стекла ТФ4 (АО «ЛЗОС») аналогичным по параметрам стеклом ZF5, а стекла Ф6 — аналогичным по параметрам стеклом H-F1 наблюдается прирост значений ФПМ. Полученный результат полезен для проведения последующих сравнений в целях оценки влияния расщепления мениска на качество изображения, поскольку каждый объектив оказывается рассчитан с использованием оценочной функции одного вида.

Замена менискового корректора склеенным дублетом и оптимизация с использованием тяжелых кронов АО «ЛЗОС» и CDGM. Найденные ранее представляющие практический интерес комбинации стекол (Ф19 и Ф4, H-F5 и F3, H-ZBAF4 и F3) для применения в склеенном двухлинзовом мениске использованы для расчета четырехлинзовых вариантов объективов «Таир». Для создания большего переисправления хроматической аберрации в переднем компоненте объектива стекла ТФ4 заменили стеклами ТФ5, ZF5 на ZF6 762.273.

Рассчитанные объективы обладают схожими значениями вторичного спектра при полной апертуре и имеют выигрыш 200 мкм относительно трехлинзовых объективов (табл. 4). В то же время параксиальный хроматизм уменьшился существенно лишь у объективов, использующих стекло из каталога CDGM. Кроме упоминавшихся неблагоприятных дисперсионных свойств флинтв Ф и ТФ (АО «ЛЗОС») эффект связан с чрезмерно высокой дисперсией стекла Ф19. Замена ТФ5 стеклом ZF6, Ф4 — F5 приводит к уменьшению преимущественно хроматизма при полной апертуре, но слабо влияет на параксиальный хроматизм.

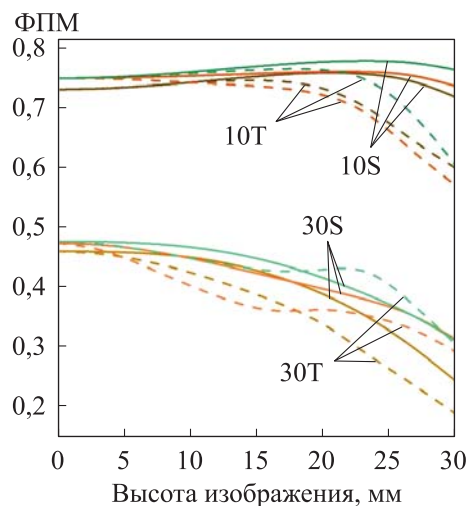
Таблица 4

**Характеристики четырехлинзовых объективов типа «Таир»,
использующих тяжелые кроны (частота 65 при ФПМ = 0,3)**

Система	Марка стекла	Вторичный спектр, мкм		ФПМ, $y' = 0$		Общая длина системы	Длина линзовой системы (осевая)
		1:4,5	1:∞	10 мм ⁻¹	30 мм ⁻¹		
Ф19 / Ф4	TK14 / ТФ5 / Ф19 / Ф4	1324	1191	0,72	0,46	368	147
H-F5 / F3	H-ZK9B / ZF6 / H-F5 / F3	1296	1079	0,74	0,47	374	140
H-ZBAF4 / F3	H-ZK9B / ZF6 / H-ZBAF4 / F3	1350	1086	0,74	0,47	377	159

Несмотря на некоторые преимущества объектива, использующего комбинацию Н-F5/F3 в линзах мениска, лучшее качество изображения по полю имеет вариант с комбинацией Н-ZBAF4/F3 (рис. 4).

Рис. 4. Кривые ФПМ спектра для четырехлинзовых вариантов объектива типа «Таир» при частоте 10 и 30 мм⁻¹ для тангенциальных (Т) и сагиттальных (S) направлений (Ф19/Ф4 (—), Н-F5 / F3 (---), Н-ZBAF4 / F3 (—))



Наблюдаемая разность связана с расстоянием между мениском и изображением: как было отмечено, в общем случае чем мениск ближе к изображению, тем легче исправление полевых aberrаций. Поскольку в исследуемых вариантах кривизна и оптимальное расположение мениска обуславливаются по большей мере необходимостью коррекции латеральных и продольных хроматических aberrаций, от выбора материалов мениска сильно зависит и исправление полевых искажений.

Применение тяжелых фосфатных кронов в четырехлинзовом объективе типа «Таир». Стекла марки Н-ZPK CDGM (в каталоге АО «ЛЗОС» материалы группы ТФК отсутствуют) можно найти большее число парных материалов для ахроматического дублета, в том числе и с $\Delta P_{gf} < 0$. По параметрам наиболее интересными для применения в объективе типа «Таир» являются стекла Н-ZPK2A 605.652 и Н-ZPK5 595.680, в то время как Н-ZPK1A 620.631 имеет более слабые по сравнению с Н-ZK9B преимущества.

Оптимизация четырехлинзовой оптической схемы типа «Таир» с использованием стекла Н-ZPK2A приводит к двум близким по оптическому качеству решениям, отличающимся выбором марок оптических стекол для остальных трех линз. Параметр Аббе этого материала недостаточно велик, чтобы отказаться от тяжелых флинтгов в переднем компоненте в пользу особых и лантановых флинтгов, но достаточен для того, чтобы применять в заднем компоненте объектива комбинацию Н-ZF2 / ZF1.

По сравнению с четырехлинзовым объективом типа «Таир», использующим обычные тяжелые кроны, оба варианта со стеклом Н-ZPK2A обладают на 150...200 мкм меньшим вторичным спектром при 1:4,5 и на 100 мкм

меньшим вторичным спектром в параксиальном случае (табл. 5). При этом замена тяжелого крона Н-ZK9В кроном Н-ZPK2A не привела к каким-либо существенным изменениям качества изображения по полю: прирост значений ФПМ для частоты 10 и 30 мм⁻¹ для изображения на оси и краю поля примерно одинаковый.

Таблица 5

**Характеристики четырехлинзовых объективов типа «Таир»,
использующих стекло Н-ZPK2A 605.652**

Система	Марка стекла	Вторичный спектр, мкм		ФПМ, $y' = 0$		Частота при ФПМ = 0,3, $y' = 0$	Общая длина системы	Длина линзовой системы (осевая)
		1:4,5	1:∞	10 мм ⁻¹	30 мм ⁻¹			
ZF5 / H-ZBAF4 / F3	H-ZPK2A / ZF5 / H-ZBAF4 / F3	1152	924	0,79	0,51	70	375	151
ZF6 / H-ZF2 / ZF1	H-ZPK2A / ZF6 / H-ZF2 / ZF1	1145	949	0,79	0,52	72	368	144

Низкодисперсное стекло Н-ZPK5 позволяет перейти при оптимизации к использованию в качестве пары для ахроматического дублета материалов с большими значениями ν_d , среди которых можно выделить тяжелые флинты ZF2 и ZF3, лантановый флинт Н-LAF4 и особый флинт Н-TF8. Напомним, что стекла ZF2 и Н-TF8 обладают существенным отрицательным отклонением относительной частной дисперсии P_{gF} от нормальной прямой, в то время как стекла ZF3 и Н-LAF4 практически лежат на ней (см. рис. 2). При этом Н-LAF4 и Н-TF8 похожи по параметрам и, в сущности, Н-LAF4 является доступной заменой Н-TF8. Стекло ZF3 при близком к Н-TF8 показателе преломления обладает большей дисперсией, что частично может компенсировать более высокую относительную частную дисперсию P_{gF} при исправлении вторичного спектра.

В качестве материалов для изготовления склеенного менискового корректора в расчетах использованы пары Н-F3/F1, Н-F4/F1, Н-ZF2/Н-ZF1, Н-ZF3/ZF2, Н-ZBAF4/F3, Н-ZBAF4/F5, Н-F5/F3. Применение мениска, склеенного из стекол типа Н-ZF/ZF, приводит к хорошему исправлению сферохроматических искажений в центральной области изображения, но не позволяет достичь сравнимого с рассчитанными ранее вариантами качества

изображения на краю поля. В случае когда в качестве переднего компонента используется пара H-ZPK5/H-TF8 или H-ZPK5/H-LAF4, наилучший результат достигается при применении для мениска пары стекол H-ZBAF4/F3. Если в переднем компоненте используется стекло ZF2, то вместо F3 в мениске приходится выбирать более дисперсный флинт F5. Если ахроматический дублет представлен парой H-ZPK5/ZF3, то наиболее интересным решением оказалось применение мениска из пары H-F3/F1. Последний вариант похож по балансу полевых аберраций на результат оптимизации с использованием пар H-ZF2/ZF1 или H-ZF3/ZF2, однако обеспечивает лучшее качество изображения, что может свидетельствовать о существовании оптимума показателя преломления для менискового корректора.

Значение вторичного спектра рассматриваемых вариантов объектива на стекле H-ZPK5 оказывается близким при полной апертуре (табл. 6) и на 200...300 мкм меньше по сравнению с объективами на стекле H-ZPK2A. В параксиальном случае кривые вторичного спектра также похожи у объективов с комбинациями H-ZBAF4/F3 и H-ZBAF4/F5 в менисковом корректоре. Схожий вид кривой имеет и не рассматриваемый подробно в рамках настоящей работы вариант объектива с комбинацией стекол H-ZPK5/ZF3/H-ZBAF4/F3, но объектив H-ZPK5/ZF3/H-F3/F1 обладает значительно лучшими исправленными хроматическими аберрациями по сравнению с остальными. Значение его параксиального вторичного спектра на 250...300 мкм меньше, чем для других рассматриваемых вариантов. Это означает, что при малых апертурах вплоть до достижения дифракционного ограничения такой объектив будет обладать более высоким качеством изображения по сравнению с остальными. Действительно, при относительном отверстии 1:8 объектив H-ZPK5/ZF3/H-F3/F1 имеет значение ФПМ при частоте 30 мм⁻¹ на 0,05 выше, чем объектив на стекле H-ZPK5/H-TF8/H-ZBAF4/F3.

В объективе H-ZPK5/ZF3/H-F3/F1 (параметры оптической схемы приведены в табл. 7) лучше исправлены монохроматические аберрации в центральной области изображения, хотя качество изображения на краю поля несколько уступает другим вариантам, среди которых по совокупности свойств также интересен объектив на стекле H-ZPK5/ZF2/H-ZBAF4/F5, не использующий особых и лантановых флинтов (рис. 5).

Рассчитанные четырехлинзовые объективы типа «Таир» со стеклом H-ZPK5 оказались значительно лучше по оптическому качеству по сравнению с объективами, использующими стекло H-ZPK2A. Роль дорогостоящих марок оптического стекла, а именно особых флинтов, в рассматриваемом случае не является решающей и стекло H-TF8 может быть заменено

без значительной потери оптического качества стеклами H-LAF4 или тяжелыми флинтами ZF2, ZF3. Прирост оптического качества по мере подбора материалов и модификации оптической схемы объектива типа «Таир» показан на рис. 6.

Таблица 6

**Характеристики четырехлинзовых объективов типа «Таир»,
использующих стекло H-ZPK5 595.680**

Система	Марка стекла	Вторичный спектр, мкм		ФПМ, $y' = 0$		Частота при ФПМ = $= 0,3, y' = 0$	Общая длина системы	Длина линзовой системы (осевая)
		1:4,5	1:∞	10 мм ⁻¹	30 мм ⁻¹			
H-TF8/ H-ZBAF4/ F3	H-ZPK5/ H-TF8/ H-ZBAF4/ F3	809	833	0,83	0,54	82	375	165
H-LAF4/ H-ZBAF4/ F3	H-ZPK5/ H-LAF4/ H-ZBAF4/ F3	923	851	0,82	0,53	85	375	155
ZF2/ H-ZBAF4/ F5	H-ZPK5/ ZF2/ H-ZBAF4/ F5	869	801	0,83	0,55	82	379	169
ZF3/ H-F3/F1	H-ZPK5/ H-ZF3/ H-F3/F1	860	675	0,84	0,57	83	370	126

Таблица 7

**Параметры оптической схемы четырехлинзового объектива типа
«Таир» ($F = 400$ мм, 1:4,5)**

Номер поверхности	R , мм	Толщина, мм	Марка стекла	n_d	ν_d	Высота, мм
1	181,9	14,5	H-ZPK5	1,593	68,34	50,2
2	-281,1	5,35	Воздух	–	–	49,8
3	-249,5	5,0	H-ZF3	1,717	29,51	47,8
4	∞	49,25	Воздух	–	–	46,7
5*		37,80	Воздух			36,3
6	59,42	14,0	H-F3	1,617	36,65	35,2
7	∞	3,0	F1	1,603	38,02	34,5
8	48,93	243,9**	Воздух	–	–	30,6
*Апертурная диафрагма. **Расстояние до ПНУ при относительном отверстии 1:4,5.						

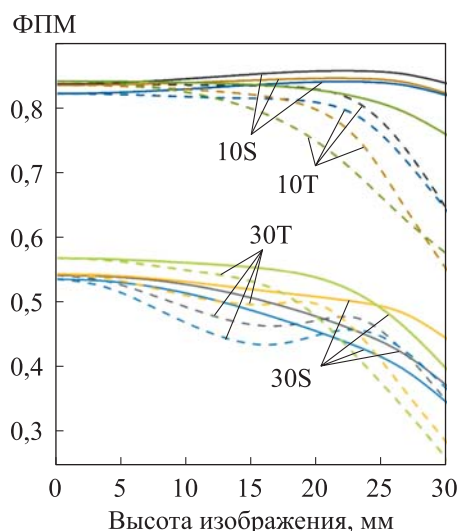


Рис. 5. Кривые ФПМ спектра для четырехлинзовых вариантов объектива типа «Таир» со стеклом H-ZPK5 при частоте 10 и 30 мм⁻¹ для тангенциальных (Т) и сагиттальных (S) направлений (H-TF8/H-ZBAF4/F3 (—), H-LAF4/H-ZBAF4/F3 (—), H-ZF3/H-F3/F1 (—))

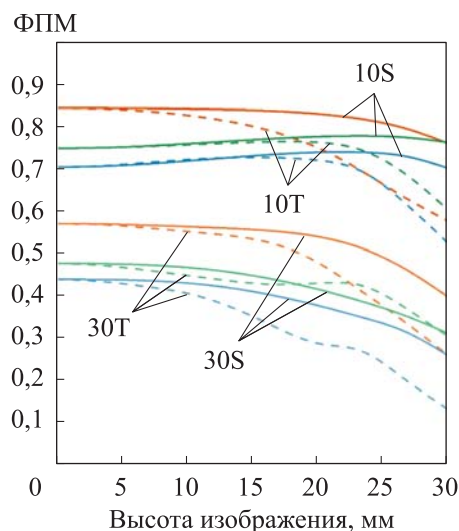


Рис. 6. Кривые ФПМ спектра для трехлинзового оптимизированного варианта объектива типа «Таир-3» H-ZK9B/ZF5/H-F1 (—), четырехлинзовых объективов типа «Таир» H-ZK9B/ZF6/H-ZBAF4/F3 (—) и H-ZPK5/ZF3/H-F3/F1 (—) при частоте 10 и 30 мм⁻¹ для тангенциальных (Т) и сагиттальных (S) направлений

Закключение. Замена менискового корректора объектива типа «Таир-3» склеенным из двух линз дублетом позволила повысить качество изображения при склеенной границе и одной плоской поверхности отрицательной линзы переднего компонента. Показано, что положительная линза менискового дублета должна быть выполнена из стекла с высоким значением относительной частной дисперсии, а отрицательная — с низким, причем показатель преломления и дисперсия материала положительной линзы должны быть выше, но близки по параметрам материала к отрицательной линзе. В каталоге стекла АО «ЛЗОС» подобрать требуемые комбинации стекол оказалось затруднительно вследствие как крайне малого числа близких по параметрам материалов, так и недостаточного числа материалов с аномальными дисперсионными свойствами. Широкие возможности предоставляет каталог стекол CDGM, в котором большинство флинтв доступны в двух вариантах, различающихся по химическому составу и, следовательно, дисперсионным свойствам при одинаковых основных параметрах.

Так, RoHS-совместимые стекла H-F и H-ZF обладают выраженным положительным отклонением относительной частной дисперсии от нормальной прямой, а многие традиционные свинцовые серии F и ZF имеют отрицательное или околонулевое отклонение. Использование первых в положительной линзе склеенного мениска, а вторых в отрицательных позволяет уменьшить вторичный спектр примерно на 10...15 % без использования редких материалов типа особых кронов.

Значительное преимущество дает применение отсутствующих в каталоге оптического стекла АО «ЛЗОС» тяжелых фосфатных кронов типа CDGM H-ZPK5 в положительной линзе переднего компонента объектива. Высокий показатель преломления, низкая дисперсия и аномальное положительное отклонение P_{gF} от нормальной прямой позволяют достичь эффективной коррекции сферохроматических аберраций в объективе типа «Таир» без усложнения оптической схемы. Применение в совокупности с H-ZPK5 особых флинтов, как оказалось, не дает значимого преимущества по сравнению с объективами на лантановых или тяжелых флинтах. Кроме того, показано, что особый флинт H-TF8 имеет сравнительно небольшое отклонение от нормальной прямой, близкое по значению к тяжелому флинту ZF2.

Реализованная оптимизация привела к уменьшению вторичного спектра объектива типа «Таир» в 2 раза в диапазоне значений 400...700 нм, увеличению на 30 % разрешающей способности для заданной спектральной функции (см. табл. 1), сокращению на 30 % габаритов линзовой системы (важно для взаимной центровки переднего и заднего компонентов при сборке). При этом три линзы из четырех в объективе имеют плоские поверхности, а межлинзовый зазор в переднем компоненте составляет более 5 мм (см. табл. 7). Рассчитанный объектив может быть применен как в качестве фотографического с камерами и форматом изображения до 44 × 33 мм, так и для визуальных астрономических наблюдений с окулярами стандарта 2".

Благодарности

Автор выражает благодарность В.А. Богданкову за помощь в освоении новой области научных и практических интересов, а также за консультации по вопросам оптики и технологии производства оптических компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kingslake R., Johnson R.B. Lens design fundamentals. Academic Press, 2009.

- [2] Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscope objectives. Part I: system review and analysis. *Adv. Opt. Techn.*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 313–347.
DOI: <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0002>
- [3] Jamieson T.H. Thick meniscus field correctors. *Appl. Opt.*, 1982, vol. 21, iss. 15, pp. 2799–2803. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.21.002799>
- [4] Волосов Д.С., Шахнович А.Е., Фахретдинова Р.Г. Двухлинзовый объектив с план-астигматическим компенсатором. Патент СССР 78122. Заявл. 03.11.1944, опубл. 01.01.1949.
- [5] Лишневская Е.Б. Фотографические и проекционные объективы, разработанные в ГОИ. Л., ГОИ, 1963.
- [6] Максutow Д.Д. Астрономическая оптика. Л., Наука, 1979.
- [7] Richter R. Photographic teleobjective. Patent US2239538. Appl. 08.03.1940, publ. 22.04.1941.
- [8] Lohberg O.-W., Ulbrich H. Photographisches teleobjektiv. Patent DE1120735B. Appl. 28.12.1961.
- [9] Tautz V., Benedix G. Fuenfgliedriges fotografisches objektiv. Patent DD206240A1. Appl. 01.06.1982, publ. 18.01.1984.
- [10] Kidger M., Leamy P. The existence of local minima in lens design. *International Lens Design*, 1990, pp. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.1364/ILD.1990.LMC2>
- [11] Smith W.J. The problem of the concentric meniscus element: a possible solution to the lens designer's dilemma. *Opt. Eng.*, 1988, vol. 27, iss. 12, art. 121039.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7978673>
- [12] Царевский Е.Н., ред. Свойства и разработка новых оптических стекол. Л., Машиностроение, 1977.
- [13] Fleming J.W. Supplement 2: optical materials. Section 2. Optical glasses. In: *Handbook of Optical Materials*. CRC Press, 2003, pp. 234–305.
- [14] Fiorentin P., Bertolo A., Cavazzani S., et al. Laboratory characterisation of a commercial RGB CMOS camera for measuring night sky brightness. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, iss. 17, art. 4196. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15174196>
- [15] Kingslake R. Position of best focus of a lens in the presence of spherical aberration. In: *National Bureau of Standards circular*. US National Bureau of Standards, 1954, pp. 259–274.
- [16] Sasaki K., Kurokawa K., Makita S., et al. Extended depth of focus adaptive optics spectral domain optical coherence tomography. *Biomed. Opt. Express*, 2012, vol. 3, iss. 10, pp. 2353–2370. DOI: <https://doi.org/10.1364/BOE.3.002353>
- [17] Richter R. Projection objective. Patent US1843519A. Appl. 27.03.1931, publ. 02.02.1932.
- [18] Welford W.T. Aberrations of optical systems. CRC Press, 1986.
- [19] Seppala L.G. The IODC 1998 lens design problem revisited: a strategy for simplifying glass choices in an apochromatic design. *2nd Int. Conf. on Optical Design and Fabrication*, 2000, preprint UCRL-JC-139510.

[20] Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscope objectives. Part II: lens modules and design principles. *Adv. Opt. Techn.*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 349–384. DOI: <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0013>

Эшмаков Родион Сергеевич — ведущий инженер кафедры неорганической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Эшмаков Р.С. Модификация длиннофокусной оптической схемы объектива «Таир» с целью повышения технологичности и улучшения оптического качества. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 1 (150), с. 50–70. EDN: WHGUCF

**MODIFICATION OF THE LONG-FOCUS OPTICAL DESIGN
OF THE TAIR LENS IN ORDER TO INCREASE MANUFACTURABILITY
AND IMPROVE OPTICAL QUALITY**

R.E. Eshmakov

rodion.eshmakov
@chemistry.msu.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article optimizes the optical scheme of a long-focus achromate with a meniscus corrector *Tair* ($F = 400$ mm, 1:4.5) by dividing the labor-intensive meniscus into two simpler lenses and replacing optical materials. The analysis of the dispersion properties of optical glasses from the catalogs of LZOS JSC (Russia) and CDGM (China), which are similar in parameters to those used in the optical scheme of the corrector *Tair*, is carried out. These materials and their combinations make it possible to improve the optical quality of the original lens. The influence of the choice of lens materials for the *Tair* lens using the catalogs of LZOS JSC and CDGM on the degree of correction of chromatic aberrations and image quality, described in terms of the modulation transmission function for the visible wavelength range, is investigated. The characteristics of lenses using both the original optical scheme and a modified one using various optical materials are compared. A simplified version of the *Tair* type lens is proposed, which has a significant advantage in optical characteristics compared to other versions

Keywords

Optics, optimization, optical system, lens, meniscus corrector, optical materials, development, long-focus achromatic systems

Received 18.03.2024

Accepted 23.10.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Kingslake R., Johnson R.B. Lens design fundamentals. Academic Press, 2009.
- [2] Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscope objectives. Part I: system review and analysis. *Adv. Opt. Techn.*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 313–347.
DOI: <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0002>
- [3] Jamieson T.H. Thick meniscus field correctors. *Appl. Opt.*, 1982, vol. 21, iss. 15, pp. 2799–2803. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.21.002799>
- [4] Volosov D.S., Shakhnovich A.E., Fakhretdinova R.G. Dvukhlinzovyy obektiv s plan-astigmaticheskim kompensatorom [Doublet lens with plan-astigmatic compensator]. Patent SSSR 78122. Appl. 03.11.1944, publ. 01.01.1949 (in Russ.).
- [5] Lishnevskaya E.B. Fotograficheskie i proektsionnye obektivы, razrabotannye v GOI [Photographic and projection lenses designed in GOI]. Leningrad, GOI Publ., 1963.
- [6] Maksutov D.D. Astronomicheskaya optika [Astronomy optics]. Leningrad, Nauka Publ., 1979.
- [7] Richter R. Photographic teleobjective. Patent US2239538. Appl. 08.03.1940, publ. 22.04.1941.
- [8] Lohberg O.-W., Ulbrich H. Photographisches teleobjektiv. Patent DE1120735B. Appl. 28.12.1961.
- [9] Tautz V., Benedix G. Fuenfgliedriges fotografisches objektiv. Patent DD206240A1. Appl. 01.06.1982, publ. 18.01.1984.
- [10] Kidger M., Leamy P. The existence of local minima in lens design. *International Lens Design*, 1990, pp. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.1364/ILD.1990.LMC2>
- [11] Smith W.J. The problem of the concentric meniscus element: a possible solution to the lens designer's dilemma. *Opt. Eng.*, 1988, vol. 27, iss. 12, art. 121039.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7978673>
- [12] Tsarevskiy E.N., ed. Svoystva i razrabotka novykh opticheskikh stekol [Properties and development of new optical glasses]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [13] Fleming J.W. Supplement 2: optical materials. Section 2. Optical glasses. In: *Handbook of Optical Materials*. CRC Press, 2003, pp. 234–305.
- [14] Fiorentin P., Bertolo A., Cavazzani S., et al. Laboratory characterisation of a commercial RGB CMOS camera for measuring night sky brightness. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, iss. 17, art. 4196. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15174196>
- [15] Kingslake R. Position of best focus of a lens in the presence of spherical aberration. In: *National Bureau of Standards circular*. US National Bureau of Standards, 1954, pp. 259–274.
- [16] Sasaki K., Kurokawa K., Makita S., et al. Extended depth of focus adaptive optics spectral domain optical coherence tomography. *Biomed. Opt. Express*, 2012, vol. 3, iss. 10, pp. 2353–2370. DOI: <https://doi.org/10.1364/BOE.3.002353>
- [17] Richter R. Projection objective. Patent US1843519A. Appl. 27.03.1931, publ. 02.02.1932.

- [18] Welford W.T. Aberrations of optical systems. CRC Press, 1986.
- [19] Seppala L.G. The IODC 1998 lens design problem revisited: a strategy for simplifying glass choices in an apochromatic design. *2nd Int. Conf. on Optical Design and Fabrication*, 2000, preprint UCRL-JC-139510.
- [20] Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscope objectives. Part II: lens modules and design principles. *Adv. Opt. Techn.*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 349–384.
DOI: <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0013>

Eshmakov R.E. — Lead Engineer, Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory 1, str. 3, Moscow, 119991 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Eshmakov R.E. Modification of the long-focus optical design of the *Tair* lens in order to increase manufacturability and improve optical quality. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 1 (150), pp. 50–70 (in Russ.). EDN: WHGUCF