

МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ**А. М. Безуглый*, А. В. Бахолдин***Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*** ambezuglyi@itmo.ru*

Аннотация. Исследована фотографическая оптическая система, объектив которой рассчитан для предмета, расположенного в бесконечности, и изображения, находящегося в задней фокальной плоскости. Сформулированы критерии согласованности оптической системы (объектив) и приемной поверхности (ФПЗС или КМОП-приемник), связанные со сборкой, юстировкой и материальной базой системы. Приведены примеры согласования оптики и приемной поверхности плоской и неплоской формы с использованием предложенного метода. Учет выделенных критериев согласованности при сборке и юстировке объектива и приемника позволяет добиться установки приемника в плоскости наилучшего качества изображения. Использование приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы изменяет порядок расчета критериев согласованности. Предложенный метод согласования объектива и приемника может быть полезен при проектировании оптических систем, разработке приемных устройств, а также при сборке и установке объектива для корректной оценки допустимых значений линейных и угловых отклонений.

Ключевые слова: приемный модуль, фотографическая система, криволинейная фоточувствительная поверхность приемника, глубина резкости объектива, кривизна поля изображения

Ссылка для цитирования: Безуглый А. М., Бахолдин А. В. Метод согласования оптической системы и приемной поверхности криволинейной формы // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 2. С. 160–167. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-160-167.

METHOD FOR MATCHING AN OPTICAL SYSTEM WITH A CURVED RECEIVING SURFACE**A. M. Bezuglyi*, A. V. Bakholdin***ITMO University, St. Petersburg, Russia*** ambezuglyi@itmo.ru*

Abstract. A photographic optical system with a lens designed for an object located at infinity and an image located in the rear focal plane is investigated. Matching criteria for the optical system (lens) and the receiving surface (CCD or CMOS receiver) related to the assembly, adjustment, and material base of the system are formulated. Examples of matching optics with a flat and non-flat receiving surface using the proposed method are given. Taking into account the selected matching criteria during assembly and adjustment of the lens and receiver allows for installing the receiver in the plane of the best image quality. Using a receiver with a curved photosensitive surface changes the order of calculating the matching criteria. The proposed method for matching lens and receiver can be useful in designing optical systems, developing receiving devices, and also in assembling and installing the lens for correctly assessing the permissible values of linear and angular deviations.

Keywords: receiving module, photographic system, curved photosensitive surface, lens depth of field, image field curvature

For citation: Bezuglyi A. M., Bakholdin A. V. A method for matching an optical system with a curved receiving surface. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 2. P. 160–167 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-160-167.

Введение. Согласование основных компонентов приемного модуля оптико-электронного комплекса (ОЭК) — объектива и фотоприемного устройства — является важнейшей операцией при сборке и юстировке. Операция юстировки фотографических объективов осуществляется с целью получения требуемого качества изображения по всему полю зрения. Для этого приемная поверхность фотоприемника (ФПЗС или КМОП-приемник) устанавливается по возможности

близко к плоскости наилучшего изображения. Однако при сборочных операциях неизбежны линейные и угловые перемещения приемника вдоль оптической оси объектива. Для корректировки возможных отклонений проектировщику оптической системы следует учитывать все возможные варианты расположения приемника и подбирать эффективные средства компенсации перемещений.

Целью настоящей статьи является разработка метода согласования объектива и криволинейной фоточувствительной поверхности приемника. Согласованность основных компонентов приемного модуля обеспечивается рядом критериев, связанных со сборкой и юстировкой приемного модуля.

Критерии согласованности оптической системы. Согласованность основных узлов приемного тракта — объектива и приемного устройства — является основным условием правильной работы всего ОЭК. При проектировании объектива и неплоской фоточувствительной поверхности приемника требуется учитывать ряд критериев, связанных со сборкой и юстировкой приемного модуля:

1) глубина резкости объектива T (рис. 1–3) — расстояние вдоль оптической оси объектива между двумя плоскостями в пространстве изображений, в пределах которых сохраняется резкость изображения; зависит от относительного отверстия объектива [1]. Приемник размещается в пределах глубины резкости, которая, в свою очередь, определяется качеством изображения;

2) линейные смещения приемника изображения по трем осям (рис. 1 — вдоль оптической оси в пределах глубины резкости объектива (масштаб случайный), 2 — относительно оси Y в пределах глубины резкости объектива (масштаб случайный); R_i — радиус пятна рассеяния, квадратом показана приемная поверхность, цветами обозначены пучки лучей; $\Delta s'$ — линейное смещение вдоль оптической оси; s' — расстояние от линзы объектива до поверхности изображения, $\Delta y'$ — линейное смещение приемника по оси Y);

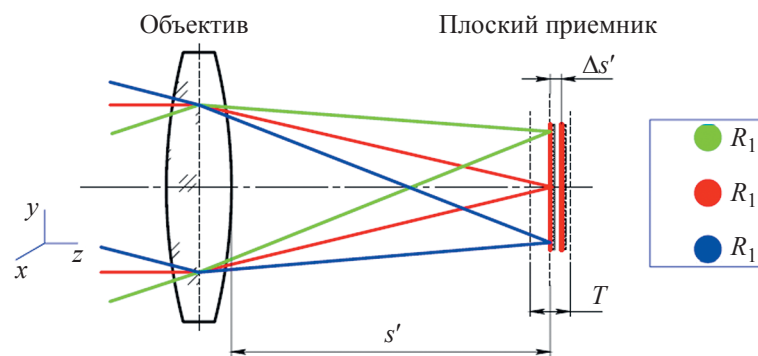


Рис. 1

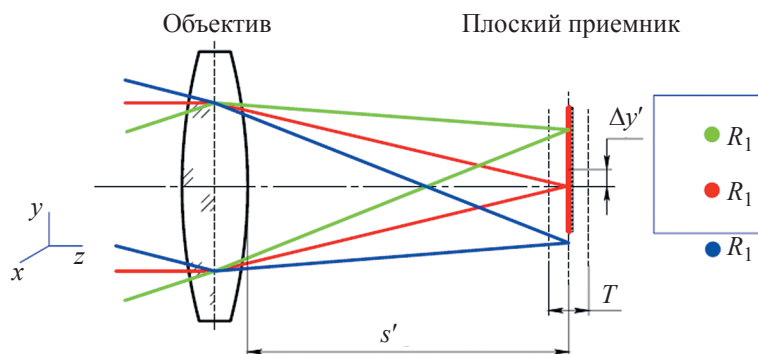


Рис. 2

3) наклон фотоприемника относительно оптической оси φ' (рис. 3). Существует предельный угол наклона (φ_{\max}), при котором сохраняется требуемое качество изображения [2];

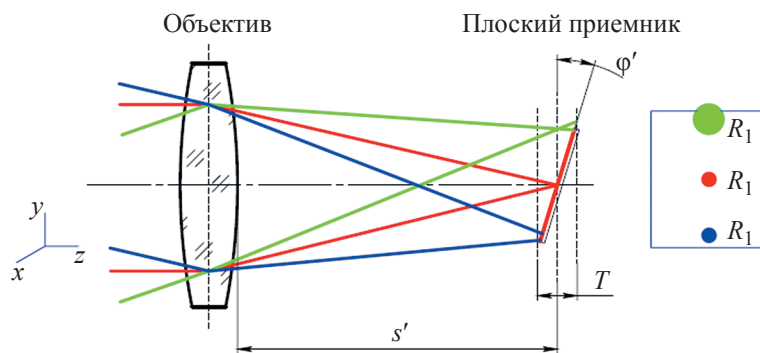


Рис. 3

4) кривизна поля изображения (c) — это одна из aberrаций оптических систем, в результате которой наилучшее изображение получается на искривленной поверхности, а не на плоскости;

5) коэффициент температурного расширения (α) — характеризует относительное изменение линейных размеров тела с изменением температуры. Последнее вызывает перемещение приемной площадки с приемниками и изменение показателя преломления оптических материалов объектива [3], что приводит к расфокусировке оптической системы. При перепадах температуры во время эксплуатации приемного модуля возникает необходимость в применении системы термокомпенсации. Для преодоления проблемы расфокусировки можно использовать ручную юстировку оптической системы, подбор материалов для пассивной компенсации или монтаж линз с учетом возможных перемещений [3]. При высоких рабочих температурах приемника для снижения теплового шума целесообразно применять систему охлаждения, например, элементы Пельтье.

Метод согласования приемного тракта. В работе рассматривается фотографическая система, объектив которой рассчитывается для предмета, расположенного в бесконечности, и изображения, находящегося в задней фокальной плоскости [4]. Численное моделирование критериев, связанных с расположением приемника [5] в приемном тракте, выполнено для плоской фоточувствительной поверхности приемника.

На рис. 4 представлены входной и выходной зрачки оптической системы с центрами в точках C и C' . В пространстве изображений всегда имеется плоскость E' фоточувствительной зоны приемника излучения [6]. Если какая-либо точка предмета лежит в плоскости наводки E , то на плоскости E' изображение этой точки — резкое (при идеальной оптической системе) [7].

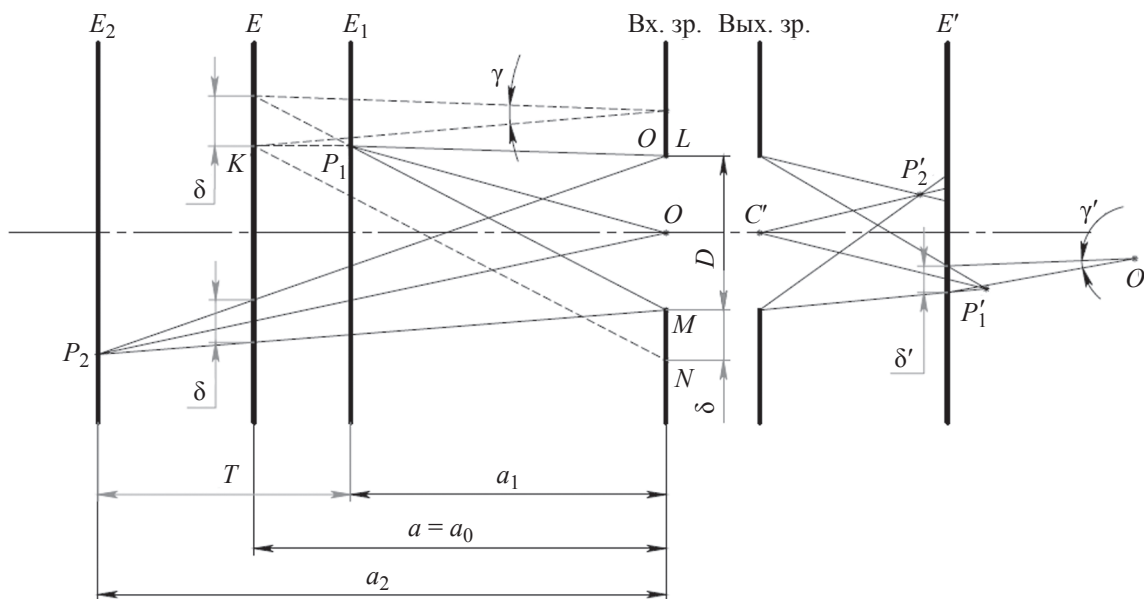


Рис. 4

Отрезок a — положительный. Пусть некоторая точка P_1 предмета расположена ближе к входному зрачку, чем плоскость E . Тогда пучок лучей, исходящих из точки P_1 и попадающих во входной зрачок D , после выходного зрачка направится в точку P'_1 , сопряженную с точкой P_1 и не лежащую в плоскости E' . При этом на плоскости E' вместо резкого изображения точки P_1 возникнет кружок рассеяния R_i (рис. 1–3) диаметром δ' .

Для нахождения отрезка a_1 сначала определяется отрезок δ , лежащий в плоскости E , его концы — на продолжении лучей P_1L и P_1M . Отрезок δ является диаметром кружка рассеяния, перенесенного в пространство предметов. Если в пространстве предметов находится наблюдатель, зрачок глаза которого расположен в центре плоскости входного зрачка D , тогда наблюдатель будет видеть пятно диаметром δ под углом γ : $\gamma = \delta/a$.

Углы γ и γ' связаны через видимое увеличение Γ : $\Gamma = \gamma'/\gamma$; при $\Gamma = 1$ — $\gamma' = \gamma = 1'$. Из подобия треугольников OP_1M и OKN получаем

$$\frac{1}{a_1} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a_0},$$

откуда расстояние, с которого входной зрачок диаметром D различим под предельным углом разрешающей способности, рассчитывается по формуле:

$$a_0 = \frac{D}{\gamma}.$$

Рассмотрим случай, когда точка P_2 лежит на заднем плане E_2 , находящемся на расстоянии a_2 от входного зрачка прибора, причем $a_2 > a$. Изображение P'_2 точки P_2 также не лежит в плоскости E' , где возникает кружок рассеяния δ' . Сопряженный с ним кружок δ лежит на плоскости наводки E , при этом находится

$$\frac{1}{a_2} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_0}.$$

Глубина резкости объектива является расстоянием от заднего плана до переднего:

$$T = a_2 - a_1.$$

Сдвиг приемника вдоль оптической оси в пределах глубины резкости объектива (см. рис. 1) описывается следующими уравнениями:

$$\Delta y' = 0, \Delta x' = 0, \Delta \varphi' = 0, \Delta s' \neq 0, y' = \frac{l_0}{2},$$

где l_0 — заданный размер диагонали приемника.

Смещение приемника относительно осей X и Y в пределах глубины резкости объектива (см. рис. 2) описывается следующими уравнениями:

$$\Delta y' \neq 0, \Delta x' \neq 0, \Delta \varphi' = 0, \Delta s' = 0, y' = \frac{l_0}{2}.$$

При постоянном расположении объектива смещение приемника вызывает появление слепых зон в плоскости изображения.

В качестве следующего критерия согласованности в работе рассматривается наклон приемника относительно оптической оси φ (см. рис. 3):

$$\Delta y' = 0, \Delta x' = 0, \Delta \varphi' \neq 0, \Delta s' = y' \sin \Delta \varphi, y' = \frac{l_0}{2}.$$

Как видно из рис. 3, при больших углах наклона приемника во время установки или юстировки приемного модуля возможна потеря требуемого качества изображения в осевой и краевых точках поля изображения. Оценить предельно допустимый угол наклона приемника можно по формуле:

$$\varphi_{\max} = \arctg\left(\frac{T}{2y'}\right).$$

При превышении φ_{\max} требуется корректировка положения приемника. Для этого можно использовать компенсационные подкладки в расчетных точках приемной площадки или угловые юстировочные подвижки [7].

Кривизна поля изображения как критерий согласованности влияет на полученное изображение на приемной поверхности. В результате изображение плоского предмета получается резким не в плоскости, а на искривленной поверхности. Если линзы, входящие в состав объектива, имеют сферические преломляющие поверхности радиуса r_k и в системе исправлен астигматизм, то изображение плоскости, перпендикулярной оси оптической системы, представляет собой сферу. Радиус этой сферы (r) и кривизна поля изображения (c) определяются соотношением:

$$c = \frac{1}{r} = \sum_k \frac{1}{r_k} \left(\frac{1}{n_{k+1}} - \frac{1}{n_k} \right),$$

где n_k, n_{k+1} — показатели преломления сред, расположенных перед и за k -й преломляющей поверхностью. В сложных оптических системах кривизну поля исправляют, сочетая линзы с поверхностями разной кривизны так, чтобы правая часть формулы стала равна нулю [8, 9].

В расчете критериев, связанных с расположением приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы [10] (рис. 5, *a* — внешний вид мембранного приемника, *b* — величина прогиба мембранного приемника) используется геометрическая кривизна поверхности изображения (R_{img}). С учетом этого параметра криволинейная фоточувствительная поверхность описывается длиной дуги окружности: $y' = L(R_{\text{img}})$.

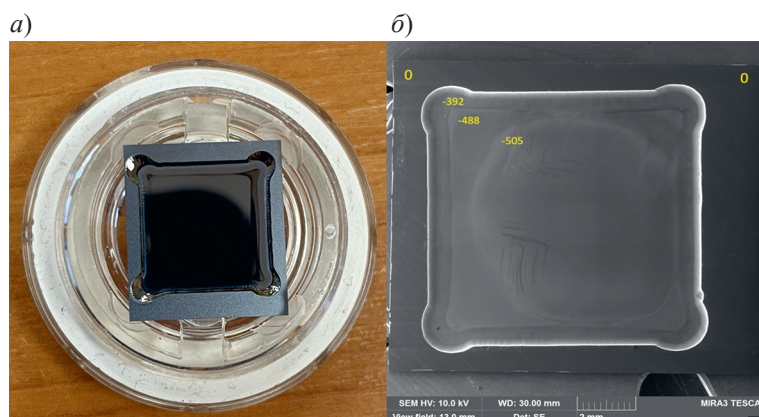


Рис. 5

Через формулу Гюйгенса [11] получим:

$$L(R_{\text{img}}) = 2m + \frac{(2m - l_0)}{3},$$

где m — длина хорды половины дуги окружности $L(R_{\text{img}})$, l_0 — длина хорды $L(R_{\text{img}})$ — размер диагонали приемника (рис. 6). При использовании этой формулы возникает незначительная погрешность: например, относительная погрешность при угле дуги 60° составляет 0,5 %. Погрешность снижается при уменьшении угла дуги.

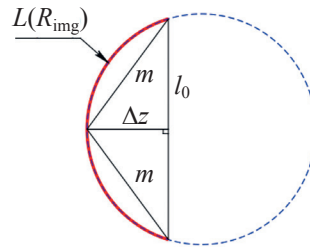


Рис. 6

Уравнения, описывающие сдвиг вдоль оптической оси в пределах глубины резкости объектива (рис. 7), принимают следующий вид: $\Delta y' = 0, \Delta x' = 0, \Delta \phi' = 0, \Delta s' \neq 0, y' = L(R_{img})$.

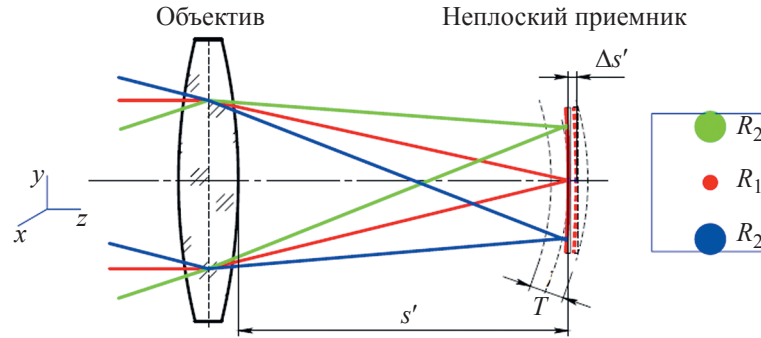


Рис. 7

Смещение приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы относительно осей X и Y в пределах глубины резкости (рис. 8) описывается следующими уравнениями: $\Delta y' \neq 0, \Delta x' \neq 0, \Delta \phi' = 0, \Delta s' \neq 0, y' = L(R_{img})$.

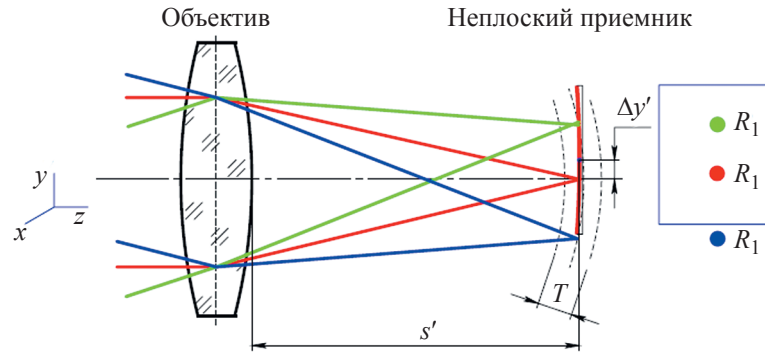


Рис. 8

Наклон приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы (рис. 9) описывается следующими уравнениями: $\Delta y' = 0, \Delta x' = 0, \Delta \phi' \neq 0, \Delta s' = L(R_{img}) \sin \Delta \phi', y' = L(R_{img})$.

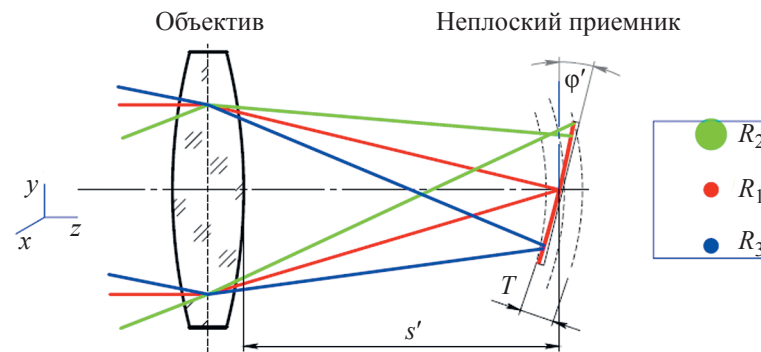


Рис. 9

В качестве примера рассмотрим приемный модуль со следующими характеристиками: $f' = 100$ мм, $k = 4,0$, $l_0 = 32,5$ мм, линейные размеры приемника 23×23 мм. Для выбранных исходных данных с использованием предложенного метода путем численного моделирования получены следующие результаты: диаметр входного зрачка $D = 25$ мм, глубина резкости объектива $T = 2,4$ мм; кривизна поля изображения $c = -0,010$ мм⁻¹; смещение приемника относительно осей X и Y в пределах глубины резкости объектива $\Delta x' = 0,25$ мм и $\Delta y' = 0,15$ мм; наклон приемника относительно оптической оси $\Delta\varphi' = 3^\circ$; сдвиг вдоль оптической оси с учетом наклона приемника $\Delta s' = 1,63$ мм; предельно допустимый угол наклона приемника с учетом глубины резкости $\varphi_{\max} = 4^\circ$.

В качестве следующего примера рассмотрим приемный модуль, в котором установлен приемник с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы. Исходные характеристики приемного модуля: $f' = 100$ мм, $k = 4,0$, $R_{\text{img}} = 220$ мм, прогиб приемной поверхности (см. рис. 6) $\Delta z = 1,8$ мм, линейные размеры приемника 23×23 мм. С использованием предложенного метода для выбранных исходных данных получено: диаметр входного зрачка $D = 25$ мм, глубина резкости объектива $T = 2,4$ мм; кривизна поля изображения $c = -0,009$ мм⁻¹; смещение приемника относительно осей X и Y в пределах глубины резкости объектива $\Delta x' = 0,25$ мм и $\Delta y' = 0,15$ мм; наклон приемника относительно оптической оси $\Delta\varphi' = 3^\circ$; сдвиг вдоль оптической оси с учетом наклона приемника $\Delta s' = 1,36$ мм; предельно допустимый угол наклона приемника с учетом глубины резкости $\varphi_{\max} = 5^\circ$.

Для корректировки линейных смещений приемника изображения по трем осям и наклону приемника относительно оптической оси в приемном модуле рекомендуется использовать компенсационные подкладки в расчетных точках. Толщина подкладок вычисляется путем нахождения точек по полю изображения (осевые и краевые точки) [2].

Заключение. В работе представлен метод согласования основных частей приемного модуля — объектива и приемного устройства. Сборка и юстировка оптической системы с приемником с учетом выделенных в работе критериев согласованности позволяют добиться наилучшего качества изображения. Использование в приемном модуле приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы изменяет процедуру расчета критериев согласованности. При постоянных конструктивных параметрах объектива за счет криволинейной приемной поверхности обеспечивается уменьшение кривизны поверхности изображения в сравнении с приемной поверхностью плоской формы.

Метод согласования оптической системы и приемной поверхности криволинейной формы может быть полезен при проектировании оптических систем, разработке приемных устройств, а также при сборке и установке объектива для корректной оценки допустимых значений линейных и угловых отклонений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иофис Е. А. Фотокинотехника. М.: Сов. энциклопедия, 1981. 447 с.
2. Строилов Н. А., Белинская Е. В., Брысин Н. Н., Василейская А. Н., Воронков С. В., Никитин А. В., Фориш А. А. Критерии и методы фокусировки высокоточных оптических измерительных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 119–130.
3. Ульянова Е. О., Шатунов К. П. Термокомпенсация в оптической системе тепловизионного прибора // Прикладная физика. 2012. Т. 2. С. 116–120.
4. Бахолдин А. В., Романова Г. Э., Цуканова Г. И. Теория и методы проектирования оптических систем: учеб. пособие / Под ред. проф. А. А. Шехонина. СПб: СПб НИУ ИТМО, 2011. 104 с.
5. Безуглый А. М. Исследование возможности увеличения рабочего поля при использовании неплоских приемных площадок зеркальных камер // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2022. Т. 2. С. 155–156.
6. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.
7. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007. 579 с.
8. Тудоровский Д. И. Теория оптических приборов. М.–Л., 1948.

9. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л., 1969.
10. Безуглый А. М., Бахолдин А. В. Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 511–518.
11. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. 1987. № 27. С. 212.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Артём Михайлович Безуглый** — магистрант; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; аспирант; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; директор ЦПО; E-mail: bakholdin@itmo.ru

Поступила в редакцию 13.05.24; одобрена после рецензирования 17.06.24; принята к публикации 25.12.24.

REFERENCES

1. Iofis E.A. *Fotokinotekhnika* (Photocinema Technology), Moscow, 1981, 447 p. (in Russ.)
2. Stroilov N.A., Belinskaya E.V., Brysin N.N., Vasileiskaya A.N., Voronkov S.V., Nikitin A.V., Forsh A.A. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2022, no. 3(19), pp. 119–130. (in Russ.)
3. Ulyanova E.O., Shatunov K.P. *Applied Physics*, 2012, vol. 2, pp. 116–120. (in Russ.)
4. Bakholdin A.V., Romanova G.E., Tsukanova G.I. *Teoriya i metody proyektirovaniya opticheskikh sistem* (Theory and Methods of Designing Optical Systems), St. Petersburg, 2011, 104 p. (in Russ.)
5. Bezugly A.M. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University*, 2022, vol. 2, pp. 155–156. (in Russ.)
6. Churilovsky V. N. *Teoriya opticheskikh priborov* (Theory of Optical Instruments), Leningrad, 1966, 565 p. (in Russ.)
7. Latyev S.M. *Konstruirovaniye tochnykh (opticheskikh) priborov* (Design of Precision (Optical) Devices), St. Petersburg, 2007, 579 p. (in Russ.)
8. Tudorovskii D.I. *Teoriya opticheskikh priborov* (Theory of Optical Instruments), Moscow, Leningrad, 1948. (in Russ.)
9. Slyusarev G.G. *Metody raschota opticheskikh sistem* (Methods of Calculating Optical Systems), Leningrad, 1969. (in Russ.)
10. Bezuglyi A.M., Bakholdin A.V., Tochilina T.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 6(67), pp. 511–518. (in Russ.)
11. Vygotsky M.Ya. *Spravochnik po elementarnoy matematike* (Handbook of Elementary Mathematics), 1987, no. 27, pp. 212. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Artyom M. Bezuglyi** — MSc; ITMO University, Applied Optics Center; Post-Graduate Student; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
- Aleksey V. Bakholdin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Applied Optics Center; Director of the Center; E-mail: bakholdin@itmo.ru

Received 13.05.24; approved after reviewing 17.06.24; accepted for publication 25.12.24.