

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-60-72

УДК 520.2.01/.07; 535.313.1; 535.313.2

# Оптическая система апланатического телескопа с главным сферическим зеркалом

Владислав Владимирович Дружин<sup>1</sup>✉,  
Даниил Трофимович Пуряев<sup>2</sup>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup>vlad.druzhin@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>

<sup>2</sup>daniil.puryaev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0684-4752>

## Аннотация

**Предмет исследования** — оптическая система телескопа с главным сферическим зеркалом и зеркальным корректором полевых аберраций. **Цель работы** заключается в разработке метода аналитического расчёта системы телескопа с главным сферическим зеркалом и двухзеркальным апланатическим корректором аберраций сферического зеркала. **Метод проведения работы** построен на анализе выполнения принципа Ферма и условия синусов Аббе в системе, состоящей из комбинации сферической поверхности и асферических поверхностей второго порядка. **Основные результаты.** Получены математические выражения профилей зеркал апланатической системы с главным сферическим зеркалом и двухэлементным зеркальным корректором полевых аберраций. Корректор содержит два вогнутых гиперболических зеркала и расположен вблизи парааксиального фокуса сферического зеркала. Фокусное расстояние телескопа равно парааксиальному фокусному расстоянию сферического зеркала. Представлены результаты расчёта двух вариантов оптических схем телескопа со следующими значениями диаметра входного зрачка, относительного отверстия и углового поля: 1)  $D = 6000$  мм,  $D:f' = 1:4$ ,  $2w = 0,12^\circ$ ; 2)  $D = 500$  мм,  $D:f' = 1:2$  и  $2w = 0,57^\circ$ . **Практическая значимость.** Применение сферического зеркала в телескопах позволяет повысить точность контроля формы поверхности сегментов телескопа в процессе изготовления и эксплуатации. Компактный корректор, состоящий только из зеркальных поверхностей, обеспечивает работу в широком спектральном диапазоне и осуществляет коррекцию сферической аберрации и комы, и таким образом позволяет увеличить относительное отверстие системы, угловое поле и качество изображения.

**Ключевые слова:** наземные телескопы, космические телескопы, проектирование зеркальных систем, большие обсерватории, асферика, зеркала

**Ссылка для цитирования:** Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Оптическая система апланатического телескопа с главным сферическим зеркалом // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 60–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-60-72>

**Коды OCIS:** 110.6770, 080.4035, 220.1000, 220.2740.

# Optical system of aplanatic telescope with spherical primary mirror

VLADISLAV V. DRUZHIN<sup>1</sup>✉, DANIL T. PURYAEV<sup>2</sup>

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Department of “Laser and Optoelectronic Systems” (RL-2), Moscow, Russia

<sup>1</sup>vlad.druzhin@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>

<sup>2</sup>daniil.puryaev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0684-4752>

## Abstract

**The subject of study** is the optical system of the telescope with a main spherical mirror and a mirror corrector of field aberrations. **The aim of study** is the description of the method of analytical calculation of the telescope system with main spherical mirror and two-mirror aplanatic corrector of spherical mirror aberrations. **The method** of carrying out the work is based on the analysis of realization of Fermat principle and the Abbe sine condition in the system consisting of a combination of a spherical surface and nonspherical surface of second order. **The main results** are the proposed mathematical equations for the mirror surface of the aplanatic system with the spherical primary mirror and two element corrector of field aberrations. The corrector contains two concave hyperbolic mirrors placed near the paraxial focus of the spherical mirror. The focal length of the telescope is equal to the paraxial focal length of the primary mirror. The results of the calculation of two variants of optical schemes of the telescope with the following values of the diameter of the entrance pupil, aperture f-number and angular field: 1)  $D = 6000$  mm,  $F$ -no = 4,  $2w = 0,12^\circ$ ; 2)  $D = 500$  мм,  $F$ -no = 2 and  $2w = 0,57^\circ$  are demonstrated. **Practical significance.** Application of the spherical mirror in telescopes makes it possible to increase the accuracy of control of the shape of the surface of telescope segments during the manufacture and operation. The compact all-mirror corrector provides the operation in a wide spectral range and corrects the spherical aberration and coma, and thus allows to increase the relative aperture of the system, angular field and image quality.

**Keywords:** ground-based telescopes, space telescopes, mirror system design, large observatories, aspherics, mirrors

**For citation:** Druzhin V.V., Puryaev D.T. Optical system of aplanatic telescope with spherical primary mirror [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 4. P. 60–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-60-72>

**OCIS codes:** 110.6770, 080.4035, 220.1000, 220.2740.

## ВВЕДЕНИЕ

Оптические системы крупных телескопов, как правило, построены по классической двухзеркальной схеме Кассегрена, Ричи-Кретьена и их модификациях с применением главного монолитного или сегментированного асферического зеркала, а также по схемам со сферическими главными зеркалами [1, 2]. Телескопы наземного базирования с главными монолитными зеркалами достигают диаметров 6–8 м [3, 4]. Проекты телескопов следующих поколений имеют главные составные зеркала диаметром 20 м и более [5–9]. Существуют проекты телескопов с диаметрами главных составных зеркал до 100 м и более [10–12]. При проектировании крупных и гигантских телескопов наземного и космического базирования

ключевым этапом является выбор оптической системы и формы главного зеркала. Размеры сегментов космических телескопов определяются малыми габаритами зоны полезной нагрузки ракеты-носителя [13–15]. Формирование единой отражающей поверхности большого телескопа с асферическими главными зеркалами представляют сложную инженерную задачу. Очевидно, что применение сферических зеркал как для больших телескопов космического базирования, так и для космических телескопов снимает большинство проблем и даёт ряд технологических, экономических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с асферическими зеркалами. Использование сферических зеркал в оптических системах телескопов требует применения

специальных корректоров аберраций сферического зеркала.

Цель работы заключается в разработке метода аналитического расчёта системы телескопа с главным сферическим зеркалом и двухзеркальным апланатическим корректором аберраций сферического зеркала.

## ТЕЛЕСКОПЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ГЛАВНЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

В настоящее время реализованы несколько проектов телескопов с главными сферическими зеркалами. Ведутся разработки новых усовершенствованных оптических систем с главными сферическими зеркалами. Из введённых в эксплуатацию телескопов можно выделить телескоп Хобби–Эберли (Hobby–Eberly Telescope, HET) и Большой южноафриканский телескоп (The Southern African Large Telescope, SALT). Телескоп Хобби–Эберли [16] введён в эксплуатацию в 1996 году. Диаметр входного зрачка телескопа равен 9 м, относительное отверстие телескопа 1:3,65. Главное сферическое зеркало диаметром 11 м и радиусом 26163,92 мм состоит из 91 шестигранного фрагмента диаметром 1 м и толщиной 52 мм. Двухкаскадный корректор аберраций диаметром 500 мм и длиной 1800 мм состоит из четырёх асферических зеркал, одно из них имеет асферическую форму 10-го порядка, остальные — поверхность второго порядка. Схема построена так, что промежуточное изображение сферического зеркала строится на поверхности второго зеркала. Качество изображения определяется диаметром пятна 58,52 мкм, в котором сосредоточено 80% энергии для точки на оси и 744 мкм для угла поля  $w = 0,05^\circ$  (3 угл. мин.). Телескоп SALT [17] с диаметром входного зрачка 9,2 м введён в эксплуатацию в 2005 году. Сферическое зеркало телескопа SALT размером 11×9,8 м с относительным отверстием 1:1,4 конструктивно состоит из 91 сегмента диаметром 1 метр каждый. Для компенсации аберраций сферического зеркала применяется четырёхзеркальный корректор аберраций с диаметрами зеркал от 100 до 600 мм. Три зеркала имеют асферическую форму поверхности, описываемую уравнением второго порядка, а третье зеркало — асферическую форму поверхности, описываемую уравнением высшего порядка с отступлением от сферы сравнения 1,5 мм.

Известны различные способы коррекции аберраций сферического зеркала. Аберрации сферического зеркала средней апертуры с умеренной светосилой 1:5 могут быть исправлены с помощью линзового корректора, расположенного вблизи фокальной плоскости, с обеспечением приемлемого качества в пределах углового поля  $2w = 0,5$  градуса [18]. Двухзеркальная оптическая система со сферическим главным зеркалом построена на основе выполнения принципа Ферма для осевого пучка лучей [19]. Угловое поле системы ограничено значительными полевыми аберрациями системы. Для увеличения углового поля предложен вариант сканирования поля с помощью поворота вторичного зеркала вокруг центра кривизны главного сферического зеркала. Схема со сферическим главным зеркалом и четырёхзеркальным корректором описана в работах [20, 21]. Главное и вторичное зеркала образуют афокальную двухзеркальную систему. В статье [22] описана оптическая схема телескопа с диаметром сферического главного зеркала 10 м. Главное и вторичное зеркала образуют афокальную двухзеркальную систему, а третье и четвёртое зеркала — систему объектива Грегори. Поверхности второго зеркала с диаметром 2,65 м и третьего с диаметром 2,72 м представляют собой вогнутые гиперboloиды вращения высшего порядка, а четвёртого с диаметром 640 мм — вогнутый сплюснутый эллипсоид высшего порядка. В работе [23] представлены варианты апланатических корректоров для телескопа с диаметром главного зеркала 25 метров и относительным отверстием 1:5. Для сферического главного зеркала с относительным отверстием 1:1,42 предложен корректор с асферическими зеркалами диаметром 2,7 м, 4,3 м, 1,2 м и 109 мм.

В работе [24] описаны варианты усовершенствованных корректоров аберраций для светосильных сферических зеркал и относительным отверстием телескопа в диапазоне от 1:3,5 до 1:10.

В работе [25] предложен вариант усовершенствованного корректора сферических аберраций для телескопа с относительным отверстием 1:6 с возможностью увеличения до 1:4. Корректор состоит из трёх зеркал диаметром 400 мм, формирующий схему с четырёхкратным отражением. Предполагается, что корректор может быть интегрирован в телескопы

типа SALT и HET при использовании плоско-зеркала.

В работе [26] описывается зеркальный сегментированный телескоп Prototype Segmented Mirror Telescope (PSMT) с главным сферическим зеркалом диаметром 1,3 метра, относительным отверстием 1:5,1 и угловым полем  $2w = 0,17^\circ$  (10 угл. мин). Главное зеркало состоит из 7 сегментов диаметром 500 мм каждый. Вторичное зеркало имеет форму сплюснутого эллипсоида. Линзовый корректор aberrаций обеспечивает угловое разрешение менее 0,6 угл. с в диапазоне углов от 0 до 10 угл. мин. и длин волн в диапазоне от 450 до 850 нм. В работе [27] предложен вариант телескопа с главным сферическим зеркалом диаметром 4,3 м, относительным отверстием 1:10,75. Главное сферическое зеркало состоит из 17 сегментов размером 1 м. Оптическая схема телескопа содержит трёхзеркальный корректор aberrаций главного зеркала.

Анализ существующих схем современных телескопов выявил, что актуальными являются направления поиска светосильной оптической схемы телескопа со сферическим главным зеркалом и малогабаритным корректором, состоящим из малого количества элементов. Для работы телескопа в широком спектральном диапазоне длин волн корректор должен представлять чисто зеркальную систему.

Цель работы заключается в разработке метода аналитического расчёта системы телескопа с главным сферическим зеркалом и двухзер-

кальным апланатическим корректором aberrаций сферического зеркала.

### ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АПЛАНАТИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

Оптическая система телескопа содержит главное сферическое зеркало, двухэлементный зеркальный корректор полевых aberrаций вблизи параксиального фокуса сферического зеркала, образуя зафокальную трёхзеркальную схему, состоящую из зеркал  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  (рис. 1). Главное зеркало  $M_1$  имеет сферическую форму с радиусом кривизны  $R$ , а зеркала  $M_2$  и  $M_3$  — асферическую форму второго порядка,  $F'$  — параксиальный фокус телескопа, точки  $O_1$ ,  $O_2$  и  $O_3$  — вершины трёх зеркал. Зеркало  $M_2$  расположено на расстоянии  $O_1O_2 = d_1$ , расстояние  $O_2O_3$  между зеркалами  $M_2$  и  $M_3$  равно  $d_2$ , вынос фокальной плоскости телескопа за вершину  $O_2$  вторичного зеркала  $O_2F' = q$ . Локальные прямоугольные системы координат зеркал  $\{O_1, Z_1, Y_1\}$ ,  $\{O_2, Z_2, Y_2\}$  и  $\{O_3, Z_3, Y_3\}$  заданы таким образом, чтобы образовывать положительные значения координат пересечения  $\{y, z\}$  луча  $ABDEF'$ , поступающего на главное зеркало на высоте  $y_1$  параллельно оптической оси. Пусть точка  $A$  расположена в фокальной плоскости телескопа, точка  $B$  имеет координаты  $(z_1, y_1)$  на поверхности главного зеркала, точки  $D$  и  $E$  — координаты  $(z_2, y_2)$  и  $(z_3, y_3)$  на зеркалах  $M_2$  и  $M_3$ , соответственно.  $C$  — центр кривизны сферического зеркала  $M_1$ . Нормаль  $BC$

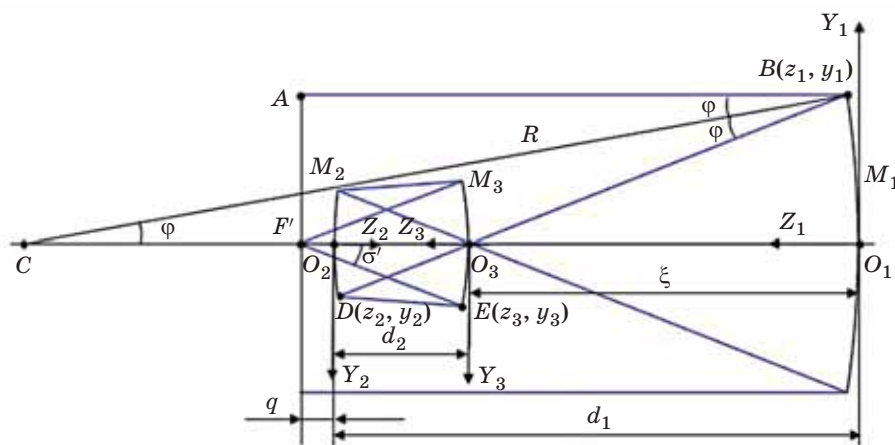


Рис. 1. Оптическая система телескопа с главным сферическим зеркалом

Fig. 1. The telescope with a main spherical mirror optical layout

к поверхности сферического зеркала в точке  $B$  составляет с оптической осью угол  $\varphi$ . Так как луч  $AB$  параллелен оптической оси, углы падения и отражения равны  $\varphi$ , а  $\sin \varphi = y/R$ .

Пусть меридиональный профиль зеркал  $M_2$  и  $M_3$  описывается уравнением второго порядка:

$$z = \frac{\frac{1}{R_0} y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \frac{1}{R_0^2} y^2}}. \quad (1)$$

Угол  $\Phi$  между нормалью к кривой второго порядка и оптической осью определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{y}{\sqrt{R_0^2 - (1+k)y^2}}, \quad (2)$$

где  $R_0$  — радиус кривизны при вершине поверхности,  $k$  — коническая константа, равная по абсолютному значению квадрату эксцентриситета  $e$  кривой второго порядка ( $k = -e^2$ ). При  $k = 0$  меридиональная кривая образует сферу, при  $k = -1$  — параболу, при  $k$  в интервале  $(-1, 0)$  — эллипс, а при  $k < -1$  — гиперболу.

Геометрические параметры, определяющие форму зеркал  $M_1, M_2, M_3$  — это конические константы  $k_1 = 0$  (главное зеркало имеет сферическую форму поверхности),  $k_2, k_3$  и радиусы кривизны при вершине  $R_{01} = R, R_{02}, R_{03}$ . На основе известных методов расчёта хода луча через асферическую поверхность и систему асферических поверхностей получены координаты точек пересечения луча с поверхностями зеркал системы:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= R - \sqrt{R^2 - y_1^2}, \\ y_1 &\left( R^2 - 2y_1^2 \right) \left( 2\sqrt{R^2 - y_1^2} (d_1(k_2 + 1) - R_{02}) - 2(k_2 + 1)R\sqrt{R^2 - y_1^2} + (k_2 + 1)R^2 \right) + \\ &+ \frac{2 y_1^2 (R^2 - y_1^2) \left[ (k_2 + 1) y_1^2 \left( 4 \left( d_1 R \left( -R\sqrt{R^2 - y_1^2} + 2R^2 - 2y_1^2 \right) + \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left. d_1^2 (y_1^2 - R^2) + R^2 \left( R\sqrt{R^2 - y_1^2} + y_1^2 \right) \right) - 5R^4 \right) + \right. \\ &\left. \left. 4R_{02} y_1^2 \left( \frac{2(R - d_1)(y_1^2 - R^2)}{R^2 \sqrt{R^2 - y_1^2}} + R_{02}^2 (R^2 - 2y_1^2)^2 \right) \right]}{k_2 (R^2 - 2y_1^2)^2 + R^4}, \\ z_2 &= \frac{y_2^2}{R_{02} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{(1+k_2)y_2^2}{R_{02}^2}} \right)}, \quad z_3 = \frac{y_3^2}{R_{03} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{(1+k_3)y_3^2}{R_{03}^2}} \right)}, \\ y_3 &= \frac{\sqrt{a_1^2 \left( a_3^2 (R_{03}^2 - (k_3 + 1)y_2^2) - 2a_3 a_1 y_2 (a_4 (k_3 + 1) - R_{03}) - \right.} \\ &\quad \left. - a_1^2 a_4 (a_4 (k_3 + 1) - 2R_{03}) \right) + a_1 a_3 (a_4 (k_3 + 1) - R_{03}) + a_3^2 (k_3 + 1) y_2}{a_1^2 + a_3^2 (k_3 + 1)}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$a_1 = \frac{2y_1\sqrt{R^2 - y_1^2}}{R^2 - 2y_1^2} - \frac{2y_2\sqrt{R_{02}^2 - (1+k_2)y_2^2}}{R_{02}^2 - (2+k_2)y_2^2},$$

$$a_2 = \sqrt{R_{02}^2 - (1+k_2)y_2^2},$$

$$a_3 = 1 + \frac{4a_2y_1\sqrt{R^2 - y_1^2}y_2}{(R^2 - 2y_1^2)(R_{02}^2 - (2+k_2)y_2^2)},$$

$$a_4 = d_2 - \frac{y_2^2}{a_2 + R_{02}}.$$

Выражения для координат пересечения поверхностей зеркал (3) представляют функциональные зависимости от высоты луча  $y_1$  и геометрических параметров поверхностей зеркал. Для обеспечения прохождения лучей через систему зеркал необходимо предусмотреть в зеркалах  $M_2$  и  $M_3$  центральные отверстия. С целью уменьшения диаметров отверстий зеркало  $M_3$  в некоторых случаях целесообразно установить в плоскости наилучшей фокусировки отражённого пучка лучей, т.е. в плоскости с минимальным значением поперечной аберрации осевого пучка лучей. Обозначим параметром  $\xi$  расстояние от зеркала  $M_1$  до зеркала  $M_3$ . Плоскость наилучшей установки для сферического зеркала определим в таком положении, при котором эта плоскость делит отрезок продольной сферической аберрации сферического зеркала в отношении 1:3. Используя точную формулу для продольной сферической аберрации сферического зеркала:

$$\Delta Sn = f' \left( \frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right),$$

найдем выражение для  $\xi$ , соответствующее плоскости наилучшей установки:

$$\xi = \frac{R}{2} - \frac{2}{3} \Delta Sn = \frac{R}{2} - \frac{2}{3} \frac{R}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2}} - 1 \right) =$$

$$= \frac{5R}{6} - \frac{R^2}{3\sqrt{R^2 - y^2}}. \quad (4)$$

Тогда расстояние между главным и вторичным зеркалом равно:

$$d_1 = d_2 + \xi. \quad (5)$$

Расчёт оптической системы заключается в определении конструктивных параметров системы, при которых система будет считаться апланатической, т.е. будет одновременно удовлетворять двум условиям: 1) формирования безаберрационного изображения на оси системы и 2) исправления аберрации кома наклонных пучков лучей.

Условие отсутствия сферической аберрации, согласно принципу Ферма, можно записать в виде равенства оптических путей лучей, проходящих через оптическую систему. Выберем два вспомогательных луча: луч, направленный параллельно оптической оси на высоте  $y = y_1$  на входном зрачке и осевой луч с координатой  $y = 0$ . Для этих лучей принцип Ферма записывается следующим образом:

$$([AB] + [BD] + [DE] + [EF']) -$$

$$- ([F'O_1] + [O_1O_2] + [O_2O_3] + [O_3F']) = 0. \quad (6)$$

Оптический путь первого вспомогательного луча определяется отрезками  $[AB]$ ,  $[BD]$ ,  $[DE]$ ,  $[EF']$ . Из геометрических соотношений, установленных на рис. 1, следует:

$$[AB] = q + d_1 - z_1, \quad (7)$$

$$[BD] = \frac{y_1 + y_2}{\sin 2\varphi} = \frac{R^2(y_1 + y_2)}{2y_1\sqrt{R^2 - y_1^2}}, \quad (8)$$

$$[DE] = d_2 - z_2 - z_3 =$$

$$= d_2 - \frac{y_2^2}{R_{02} \left( \sqrt{1 - (k_2 + 1) \left( \frac{y_2}{R_{02}} \right)^2} + 1 \right)} \quad (9)$$

$$- \frac{y_3^2}{R_{03} \left( \sqrt{1 - (k_3 + 1) \left( \frac{y_3}{R_{03}} \right)^2} + 1 \right)},$$

$$[EF'] = \sqrt{(d_2 + q - z_3)^2 + y_3^2} =$$

$$= \sqrt{\left( d_2 + q - \frac{y_3^2}{R_{03} \left( \sqrt{1 - (k_3 + 1) \left( \frac{y_3}{R_{03}} \right)^2} + 1 \right)} \right)^2 + y_3^2}. \quad (10)$$

Оптический путь второго вспомогательно-го (осевого) луча состоит из отрезков  $[F'O_1]$ ,  $[O_1O_2]$ ,  $[O_2O_3]$ ,  $[O_3F']$ .

$$[F'O_1] = q + d_1, \quad (11)$$

$$[O_1O_2] = d_1, \quad (12)$$

$$[O_2O_3] = d_2, \quad (13)$$

$$[O_3F'] = d_2 + q. \quad (14)$$

В результате подстановки в уравнение (6) и преобразований получим уравнение для обеспечения полного отсутствия сферической аберрации:

$$\frac{R^2(y_1 + y_2)}{2y_1\sqrt{R^2 - y_1^2}} - \frac{y_2^2}{R_{02} \left( \sqrt{1 - (k_2 + 1) \left( \frac{y_2}{R_{02}} \right)^2} + 1 \right)} - \frac{y_3^2}{R_{03} \left( \sqrt{1 - (k_3 + 1) \left( \frac{y_3}{R_{03}} \right)^2} + 1 \right)} - \sqrt{\left( d_2 + q - \frac{y_3^2}{R_{03} \left( \sqrt{1 - (k_3 + 1) \left( \frac{y_3}{R_{03}} \right)^2} + 1 \right)} \right)^2} + y_3^2 + \sqrt{R^2 - y_1^2} - d_1 - d_2 - q - R = 0. \quad (15)$$

Отступление от условия синусов запишем в виде:

$$\frac{y_1}{\sin \sigma'} = f'_0, \quad (16)$$

где  $f'_0$  — эффективное фокусное расстояние системы,  $y_1$  — высота луча на главном зеркале,  $\sigma'$  — угол между оптической осью и первым вспомогательным лучом после отражения от поверхности зеркала  $M_3$ . Установим, что фокусное расстояние всего телескопа равно параксиальному фокусному расстоянию сферического зеркала  $M_1$ , т.е.  $f'_0 = R/2$ . Из рис. 1 следует, что  $\sin \sigma = y_1 / EF'$ .

Подстановка в уравнение (16) даёт следующее уравнение, обеспечивающее строгое выполнение условия синусов Аббе

$$\left( d_2 + q - \frac{y_3^2}{R_{03} \left( \sqrt{1 - (k_3 + 1) \left( \frac{y_3}{R_{03}} \right)^2} + 1 \right)} \right)^2 - y_3^2 - 2 \frac{y_1}{R} = 0. \quad (17)$$

Дополнительное уравнение связи геометрических и оптических параметров системы может быть получено из уравнения, определяющего оптическую силу трёхкомпонентной оптической системы. В результате преобразований получим следующее уравнение для нахождения вершинных радиусов зеркал:

$$R_{03} = \frac{2d_1(2d_2 - R_{02}) + RR_{02} - 2d_2(R + R_{02})}{2d_1 - 2R_{02} - R}. \quad (18)$$

Для решения системы уравнений (15) и (17) необходимо задать начальные условия, к которым можно отнести следующие параметры: диаметр входного зрачка телескопа  $D$ , относительное отверстие телескопа  $D/f'_0$ , диаметр вторичного зеркала  $D_2$ . По этим данным определяют фокусное расстояние телескопа  $f'_0$ , радиус сферического зеркала  $R = 2f'_0$ , высоту первого вспомогательного луча  $y_1 = D/2$  на главном зеркале  $M_1$ , высоту  $y_2 = D/2$  на вторичном зеркале  $M_2$ . Уравнения (15), (17) совместно с уравнениями связи (3) и (18) образуют систему из семи независимых уравнений с семью неизвестными параметрами:  $R_{02}$ ,  $k_2$ ,  $y_3$ ,  $R_{03}$ ,  $k_3$ ,  $d_2$ ,  $q$ . Эти уравнения можно решить с использованием численных методов. Следует отметить, что для светосильных систем и систем со значительными угловыми полями рекомендуется приравнивать выражения (15) и (17) к ненулевым значениям малой величины, искусственно допуская малые отступления от принципа Ферма и условия синусов. Это позволяет найти оптимальные решения с достижением равномерного распределения малого значения поперечной аберрации в несколько микрометров по полю. Для достижения требуемых габаритов системы, обеспечения требуемого качества изображения или

с целью улучшения оптических характеристик дальнейшая оптимизация системы проводится с применением специализированных программ для автоматизированного расчёта оптических систем. Приведём ниже результаты расчёта конкретных оптических систем с различными размерами главных зеркал, относительными отверстиями и угловыми полями. С точки зрения авторов, предложенные системы могут найти применение для систем наземного и космического базирования.

### ВАРИАНТЫ АПЛАНТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕЛЕСКОПОВ

а) Телескоп с диаметром главного зеркала  $D = 6000$  мм, относительным отверстием  $D:f' = 1:4$  и угловым полем  $2\omega = 0,12^\circ$ .

В сущности, предлагаемый вариант телескопа является альтернативным вариантом Большого Азимутального Телескопа с главным параболическим зеркалом диаметров  $6000$  мм (БТА), работающем в первичном фокусе главного зеркала. Система первичного фокуса телескопа БТА имеет две конфигурации: 1) главное параболическое зеркало, 2) главное параболическое зеркало с двухлинзовым корректором аберраций диаметром  $700$  мм и линзы Смита [1]. Компенсатор установлен на расстоянии  $0,1$  фокусного расстояния параболического зеркала.

Предложена оптическая система телескопа первичного фокуса с главным сферическим зеркалом диаметром  $D = 6000$  мм, двухэлементным зеркальным корректором полевых аберраций диаметром  $760$  мм, расположен-

ным вблизи паракиального фокуса сферического зеркала. Конструктивные параметры оптической системы представлены в табл. 1. Корректор углового поля содержит два вогнутых гиперболических зеркала диаметром  $760$  мм. Коническая константа и радиус кривизны при вершине гиперболических зеркал выбраны таким образом, чтобы обеспечить параллельное оптической оси распространение крайнего луча осевого пучка после отражения от первого гиперболического зеркала. Гиперболические зеркала имеют центральное отверстие диаметром  $70$  мм. При этом вынос плоскости наилучшей фокусировки изображения за вершину гиперболического зеркала составляет  $7,13$  мм, а вершина второго гиперболического зеркала располагается в плоскости, образующей наименьший поперечный размер пучка лучей, проходящих через центральную часть зеркала. Фокусное расстояние телескопа составляет  $24\ 000$  мм и равно паракиальному фокусному расстоянию сферического зеркала диаметром  $6$  м. Угловое поле параболического зеркала телескопа БТА в первичном фокусе ограничено в первую очередь аберрацией кома и составляет  $2$  угловые минуты, а для параболического зеркала с трёхлинзовым корректором поля составляет  $10$  угловых минут. Влияние аберрации кома в системах с исправленной сферической аберрацией можно охарактеризовать отступлением от условия синусов Аббе:

$$\Delta = \frac{\frac{y_1}{\sin \sigma'} - f'_0}{f'_0},$$

**Таблица 1.** Конструктивные параметры оптической системы телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 6000$  мм, относительным отверстием  $D:f' = 1:4$

**Table 1.** Design parameters of the optical system of a telescope with a diameter of the main mirror  $D = 6000$  mm, relative aperture  $D:f' = 1:4$

Поверхность	Радиус кривизны при вершине $R_0$ , мм	Толщина $d$ , мм	Световой диаметр, мм	Коническая константа $k$
Сферическое зеркало $M1$	-48000,0	-23965,0	6000,0	0
Промежуточная плоскость	$\infty$	-2782,53	65,80	0
Гиперболическое зеркало $M2$	5579,35	2782,53	767,8	-1,8850
Гиперболическое зеркало $M3$	-5496,0	-2782,53	715,23	-8,51727
Промежуточная плоскость	$\infty$	-7,13	52,1	0
Плоскость приёмника	$\infty$		50,3	0

где  $f'_0$  — параксиальное фокусное расстояние системы,  $y$  — высота падения луча на главное зеркало,  $\sigma'$  — последний угол, образованный между оптической осью и лучом, падающим на высоте  $y$  на главное зеркало после прохождения луча через систему.

Для параболического зеркала:  $f'_0 = R_0/2$ ,  $\sin \sigma' = (2yR_0)/(R_0^2 + y^2)$ , где  $R_0$  — радиус кривизны при вершине. Выражение для определения отступления от условия синусов Аббе для этого случая принимает вид:

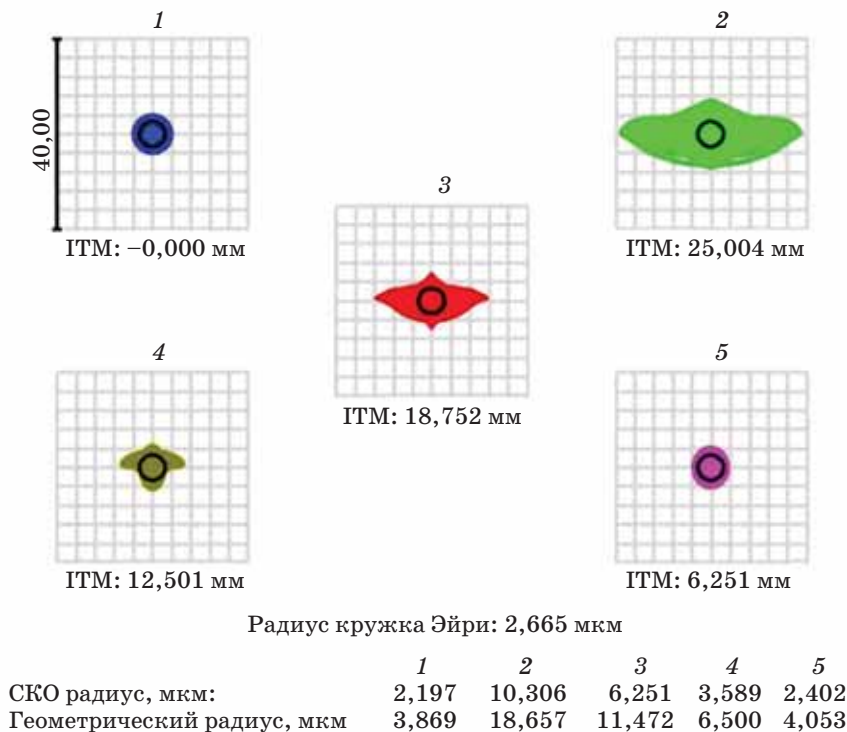
$$\Delta = \frac{y^2}{R_0^2}.$$

В телескопе БТА радиус кривизны при вершине параболического зеркала  $R_0 = 48\,000$  мм, высота крайнего луча  $y = 3000$  мм. Отступление от условия синусов для крайнего луча  $\Delta = 0,39\%$ . Это значение позволяет использовать главное зеркало телескопа БТА в пределах угла поля 2 минуты. В предлагаемой оптической системе отступление от условия синусов составляет  $\Delta = 0,021\%$ .

Анализ функции рассеяния изображения точки альтернативной системы в плоскости наилучшей фокусировки выявил, что в центральной части поля в пределах угла  $2w = 2'$  и линейного поля  $2y' = 15$  мм в системе обеспечено дифракционное качество формируемого изображения при диаметре кружка Эйри  $2\rho = 5,33$  мкм для длины волны излучения  $\lambda = 0,546$  мкм (рис. 2 и 3), что соответствует угловому полю телескопа БТА, а в пределах линейного поля  $2y' = 50$  мм среднее квадратическое отклонение (СКО) размера пятна не менее 20,6 мкм.

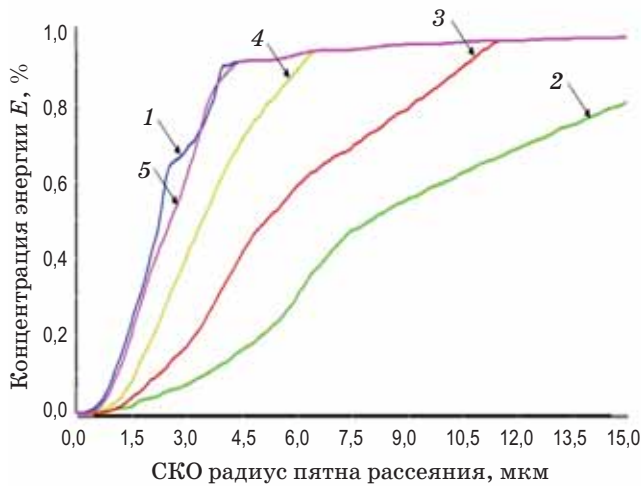
б) Телескоп космического базирования с диаметром главного зеркала  $D = 500$  мм, относительным отверстием  $D:f' = 1:2$  и угловым полем  $2w = 0,57^\circ$ .

Для сокращения габаритов системы используется компактный вариант оптической системы с плоским зеркалом диаметром 180 мм (рис. 4). Конструктивные параметры оптической системы представлены в табл. 2. Диаграмма пятен рассеяния и график концентрации энергии в пятнах рассеяния представлены



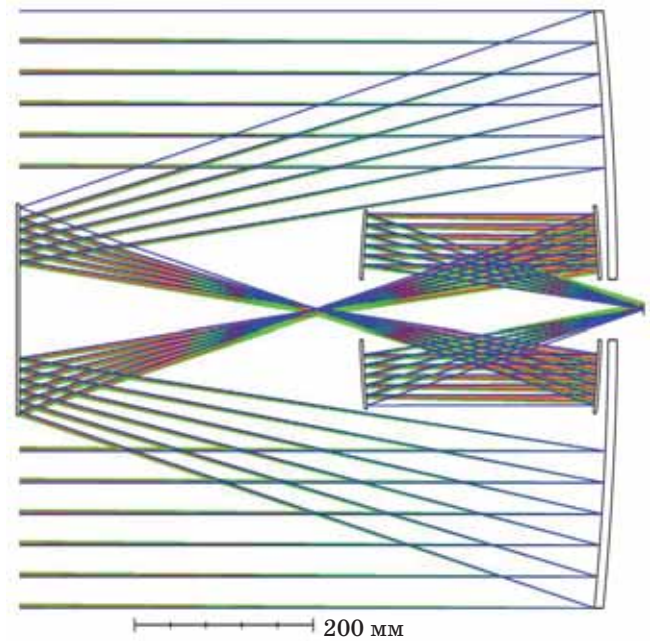
**Рис. 2.** Диаграммы пятен рассеяния телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 6000$  мм: 1 — точка на оси  $y' = 0,0$  мм, 2 — край поля  $y' = 25,0$  мм, 3 — зона  $y' = 18,75$  мм, 4 — зона  $y' = 12,5$  мм, 5 зона —  $y' = 6,25$  мм

**Fig. 2.** Spot diagrams for telescope with primary spherical mirror diameter  $D = 6000$  mm: 1 — On-axis  $y' = 0,0$  mm, 2 — max field  $y' = 25,0$  mm, 3 field —  $y' = 18,75$  mm, 4 field —  $y' = 12,5$  mm, 5 field —  $y' = 6,25$  mm



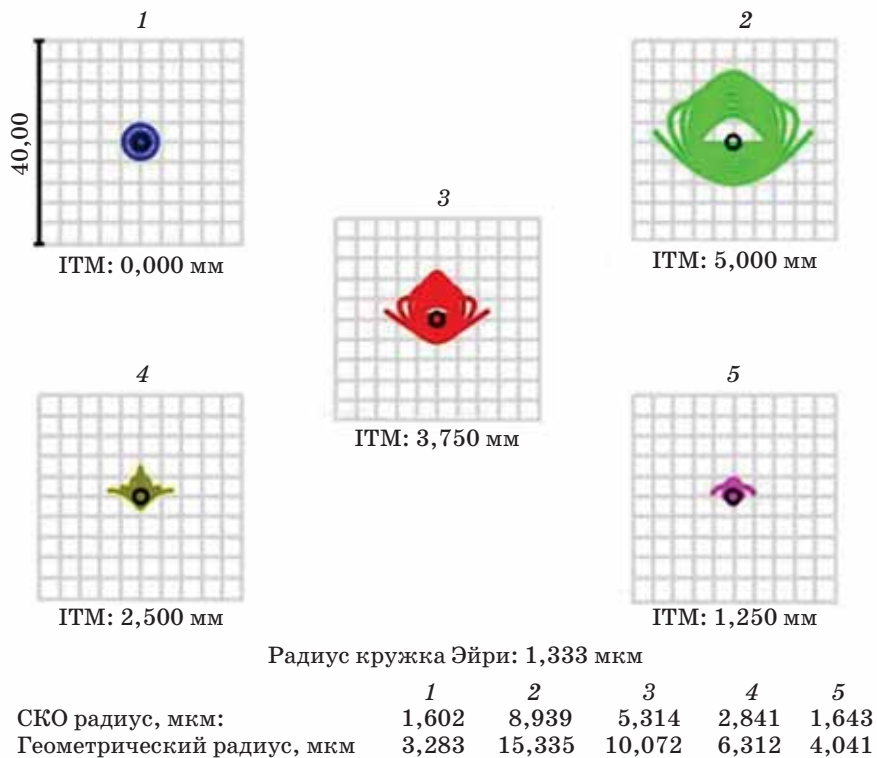
**Рис. 3.** График зависимости концентрации энергии телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 6000$  мм: 1 — точка на оси  $y' = 0,0$  мм, 2 — край поля  $y' = 25,0$  мм, 3 — зона  $y' = 18,75$  мм, 4 — зона  $y' = 12,5$  мм, 5 зона —  $y' = 6,25$  мм

**Fig. 3.** Enclosed energy distribution for telescope with primary spherical mirror diameter  $D = 6000$  mm: 1 — On-axis  $y' = 0,0$  mm, 2 — max field  $y' = 25,0$  mm, 3 field —  $y' = 18,75$  mm, 4 field —  $y' = 12,5$  mm, 5 field —  $y' = 6,25$  mm



**Рис. 4.** Оптическая схема компактного телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 500$  мм

**Fig. 4.** Optical layout of a compact telescope with primary spherical mirror diameter  $D = 500$  mm



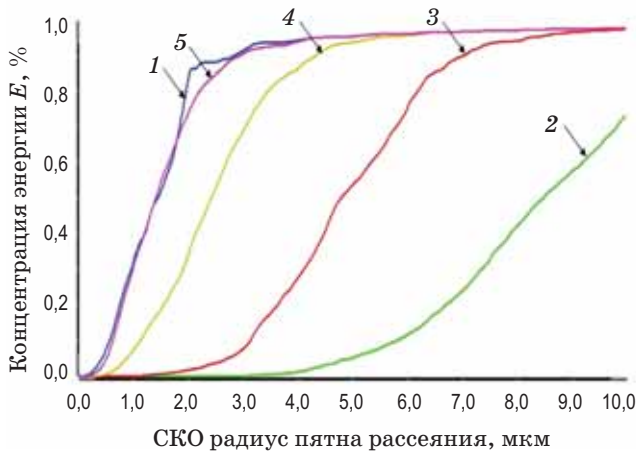
**Рис. 5.** Диаграммы пятен рассеяния телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 500$  мм: 1 — точка на оси  $y' = 0,0$  мм, 2 — край поля  $y' = 5,0$  мм, 3 зона —  $y' = 3,75$  мм, 4 зона —  $y' = 2,5$  мм, 5 зона —  $y' = 1,25$  мм

**Fig. 5.** Spot diagrams for telescope with primary spherical mirror diameter  $D = 500$  mm: 1 — On-axis  $y' = 0,0$  mm, 2 — max field  $y' = 5.0$  mm, 3 field —  $y' = 3.75$  mm, 4 — field  $y' = 2.5$  mm, 5 — field  $y' = 1.25$  mm

**Таблица 2.** Конструктивные параметры оптической системы телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 500$  мм, относительным отверстием  $D:f' = 1:2$

**Table 2.** Design parameters of the optical system of a telescope with a diameter of the main mirror  $D = 500$  mm, relative aperture  $D:f' = 1:2$

Поверхность	Радиус кривизны при вершине $R_0$ , мм	Толщина $d$ , мм	Световой диаметр, мм	Коническая константа $k$
Сферическое зеркало $M1$	-2000,0	-660,0	500,0	0
Плоское зеркало	$\infty$	649,6	176,86	0
Гиперболическое зеркало $M2$	-632,368	-264,60	173,35	-1,519
Гиперболическое зеркало $M3$	617,364	264,60	165,55	-3,477
Промежуточная плоскость	$\infty$	50,475	33,5	0
Плоскость приёмника	$\infty$		10,00	0



**Рис. 6.** График зависимости концентрации энергии телескопа с диаметром главного зеркала  $D = 500$  мм: 1 — точка на оси  $y' = 0,0$  мм, 2 — край поля  $y' = 5,0$  мм, 3 зона —  $y' = 3,75$  мм, 4 зона —  $y' = 2,5$  мм, 5 зона —  $y' = 1,25$  мм

**Fig. 6.** Enclosed energy distribution for telescope with primary spherical mirror diameter  $D = 500$  mm: 1 — On-axis  $y' = 0.0$  mm, 2 — max field  $y' = 5.0$  mm, 3 — field  $y' = 3.75$  mm, 4 — field  $y' = 2.5$  mm, 5 — field  $y' = 1.25$  mm

на рис. 5 и 6. Осевая длина системы — 700 мм. Линейное поле системы в пространстве изображений системы составляет  $2y' = 10$  мм, угловое поле  $2w = 0,573^\circ$  (34,4 угловых минуты).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Schroeder D.J. *Astronomical optics*. 2nd edition. San Diego: Academic Press, 1999. 478 p.
- Михельсон Н.Н. *Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета*. М.: Физматлит, 1995. 333 с.

СКО диаметра пятна рассеяния в пределах 50% центральной области приёмника ( $2y' = 5$  мм) не превышает размер 4,98 мкм и медленно изменяется к периферии до размера 16 мкм на краю поля.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод аналитического расчёта системы телескопа с главным сферическим зеркалом и двухзеркальным апланатическим корректором аберраций сферического зеркала. При одновременном выполнении принципа Ферма и условия синусов Аббе получены математические выражения профилей зеркал апланатической системы с главным сферическим зеркалом и 2-х элементным зеркальным корректором полевых аберраций. Корректор содержит два вогнутых гиперболических зеркала и расположен вблизи паракиально-го фокуса сферического зеркала. Фокусное расстояние телескопа равно паракиальному фокусному расстоянию сферического зеркала. Представлены результаты расчёта двух вариантов оптических схем телескопа со следующими значениями диаметра входного зрачка, относительного отверстия и углового поля: 1)  $D = 6000$  мм,  $D:f' = 1:4$ ,  $2w = 0,12^\circ$ ; 2)  $D = 500$  мм,  $D:f' = 1:2$  и  $2w = 0,57^\circ$ .

#### REFERENCES

- Schroeder D.J. *Astronomical optics*, 2nd edition. San Diego: Academic Press, 1999. 478 p.
- Mikhelson N.N. *Optics of astronomical telescopes and its calculation methods*. M.: Fizmatlit, 1995. 333 p.

3. Зверев В.А. Большой телескоп азимутальный // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 3. С. 39–50.
4. Теребиз В. Современные оптические телескопы: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Физматлит, 2005. 375 с.
5. Chisholm E.M., Larkin J.E., Wright S.A. et al. Thirty Meter Telescope: a status update on the first light instruments and the path beyond into early light instruments // Proc. SPIE. 2020. P. 114471V. <https://doi.org/10.1117/12.2559576> PSISDG 0277-786X
6. Skidmore W., Bernstein R., Dumas C., Goodrich R., Millan-Gabet R., Ramsay S., Travouillon T., Vernet J. Instrument programs of the Extremely Large Class Telescopes // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2022. V. 8. Iss. 2. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.021510>
7. Fengchuan Liu, Gary Sanders. Thirty Meter telescope project status (Conference Presentation) // Proc. SPIE 10700. Ground-based and Airborne Telescopes VII. 2018. № 7. P. 1070013. <https://doi.org/10.1117/12.2312178>
8. Tamai R., Koehler B., Cirasuolo M., Biancat-Marchet F., Tuti M., González-Herrera J.-C. The ESO's ELT construction progress // Proc. SPIE. 2020. 13 December. 11445. Ground-based and Airborne Telescopes VIII. 114451E. <https://doi.org/10.1117/12.2562828>
9. Сычев В.В., Касперский В.Б., Машинина М.Л. Оптическая система адаптивного 25-метрового телескопа с составным главным зеркалом из сферических сегментов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 2. С. 19–23.
10. Brunetto E.T., Dierickx P., Gilmozzi R., Le Louarn M., Koch F., Noethe L., Verinaud C., Yaitskova N. Progress of ESO's 100-m OWL optical telescope design // Proc. SPIE 5382. Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. 7 July 2004. <https://doi.org/10.1117/12.566200>
11. Monreal B., Rodriguez C., Carney A., Halliday R., Wang M. Wide Aperture Exoplanet Telescope: a low-cost flat configuration for a 100+ meter ground based telescope // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 26 May 2018. V. 4(2). P. 024001. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.2.024001>
12. Druzhin V.V., Puryaev D.T., Goncharov A.V. Optical system of aplanatic telescope with a 100 m spherical primary mirror // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 30 June 2022. V. 8(2). P. 024005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.024005>
13. Martin S.R., Lawrence C.R., Redding D.C., Menneson B., Rodgers J.M., Hurd K., Morgan R.M., Hu R., Steeves J.B., Jewell J.B., Phillips C., Pineda C., Ferraro N., Thibault L., Flinois B. Next-generation active telescope for space astronomy // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 8 December 2022. V. 8(4). P. 044005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.4.044005>
14. Leisawitz D., Amatucci E., Allen L. et al. Origins space telescope: trades and decisions leading to the baseline mission concept // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 13 March 2021. V. 7(1). P. 011014. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.1.011014>
15. Druzhin V.V., Puryaev D.T. Extremely fast aplanatic space telescope system with a 10-m-diameter spherical primary mirror // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 10 March 2021. V. 7(1). P. 014005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.1.014005>
16. Jungquist R.K. Optical design of the Hobby-Eberly Telescope four-mirror spherical aberration corrector // Proc. SPIE. 5 October 1999. 3779 / Current Develop-
3. Zverev V.A. Large azimuthal telescope // News of higher educational institutions. Instrumentation. 2010. T. 53. № 3. P. 39–50.
4. Terebizh V. Modern optical telescopes: Textbook. Manual for university students. M.: Fizmatlit, 2005. 375 p.
5. Chisholm E.M., Larkin J.E., Wright S.A. et al. Thirty Meter Telescope: a status update on the first light instruments and the path beyond into early light instruments // Proc. SPIE. 2020. P. 114471V. <https://doi.org/10.1117/12.2559576> PSISDG 0277-786X
6. Skidmore W., Bernstein R., Dumas C., Goodrich R., Millan-Gabet R., Ramsay S., Travouillon T., Vernet J. Instrument programs of the Extremely Large Class Telescopes // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2022. V. 8. Iss. 2. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.021510>
7. Fengchuan Liu, Gary Sanders. Thirty Meter telescope project status (Conference Presentation) // Proc. SPIE 10700. Ground-based and Airborne Telescopes VII. 2018. № 7. P. 1070013. <https://doi.org/10.1117/12.2312178>
8. Tamai R., Koehler B., Cirasuolo M., Biancat-Marchet F., Tuti M., González-Herrera J.-C. The ESO's ELT construction progress // Proc. SPIE. 2020. 13 December. 11445. Ground-based and Airborne Telescopes VIII. 114451E. <https://doi.org/10.1117/12.2562828>
9. Sychev V.V., Kasperskii V.B., Mashinina M.L. Optical system of an adaptive 25-meter telescope with a composite main mirror of spherical segments // Journal of Optical Technology. 2007. V. 74. № 2. P. 90–93. <https://doi.org/10.1364/JOT.74.000090>
10. Brunetto E.T., Dierickx P., Gilmozzi R., Le Louarn M., Koch F., Noethe L., Verinaud C., Yaitskova N. Progress of ESO's 100-m OWL optical telescope design // Proc. SPIE. 7 July 2004. 5382. Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. <https://doi.org/10.1117/12.566200>
11. Monreal B., Rodriguez C., Carney A., Halliday R., Wang M. Wide Aperture Exoplanet Telescope: a low-cost flat configuration for a 100+ meter ground based telescope // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 26 May 2018. V. 4(2). P. 024001. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.2.024001>
12. Druzhin V.V., Puryaev D.T., Goncharov A.V. Optical system of aplanatic telescope with a 100 m spherical primary mirror // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 30 June 2022. V. 8(2). P. 024005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.024005>
13. Martin S.R., Lawrence C.R., Redding D.C., Menneson B., Rodgers J.M., Hurd K., Morgan R.M., Hu R., Steeves J.B., Jewell J.B., Phillips C., Pineda C., Ferraro N., Thibault L., Flinois B. Next-generation active telescope for space astronomy // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 8 December 2022. V. 8(4). P. 044005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.4.044005>
14. Leisawitz D., Amatucci E., Allen L. et al. Origins Space Telescope: trades and decisions leading to the baseline mission concept // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 13 March 2021. V. 7(1). P. 011014. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.1.011014>
15. Druzhin V.V., Puryaev D.T. Extremely fast aplanatic space telescope system with a 10-m-diameter spherical primary mirror // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 10 March 2021. V. 7(1). P. 014005. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.1.014005>
16. Jungquist R.K. Optical design of the Hobby-Eberly Telescope four-mirror spherical aberration corrector // Proc. SPIE. 5 October 1999. 3779 / Current Develop-

- ments in Optical Design and Optical Engineering VIII. <https://doi.org/10.1117/12.368191>
17. Darragh O'Donoghue, Arek Swat. Spherical aberration corrector of the Southern African Large Telescope (SALT) // Proc. SPIE. 5 February 2002. 4411 / Large Lenses and Prisms. <https://doi.org/10.1117/12.454897>
  18. Damien J.J., William E.J. Prime focus correctors for the spherical mirror // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 4384–4388.
  19. Puryayev D.T., Goncharov A.V. Compact two-mirror schemes for telescopes with a fast spherical primary // Opt. Eng. 1 June 2000. V. 39(6). P. 1692–1696. <https://doi.org/10.1117/1.602546>
  20. Puryayev D.T. Concept for a telescope optical system with a 10-m-diam spherical primary mirror // Opt. Eng. 1 July 1996. V. 35(7). <https://doi.org/10.1117/1.600779>
  21. Puryayev D.T., Goncharov A.V. Aplanatic four-mirror system for optical telescopes with a spherical primary mirror // Opt. Eng. 1 August 1998. V. 37(8). P. 2334–2342. <https://doi.org/10.1117/1.602031>
  22. Зверев В.А., Романова Г.Э. Оптическая схема телескопа с диаметром главного зеркала 10 м // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 5. С. 49–51.
  23. Moretto G, Sebring T.A., Ray F.B., Ramsey L.W. Aplanatic corrector designs for the extremely large telescope // Appl. Opt. 2000. V. 39. P. 2805–2812. <https://doi.org/10.1364/AO.39.002805>
  24. Ackermann M.R., McGraw J.T., Zimmer P.C. Improved spherical aberration corrector for fast spherical primary mirrors // Proc. SPIE. 11 September 2008. 7061. Novel Optical Systems Design and Optimization XI. V. 70610I. <https://doi.org/10.1117/12.791666>
  25. Wenbo Yang, Yan Zhao, Ming Liu, Delong Liu. Method of space object detection by wide field of view telescope based on its following error // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 35348–35365. <https://doi.org/10.1364/OE.440842>
  26. Radhika Dharmadhikari, Annu Jacob, Padmakar Parihar. Optical design of FOSC and wide field aberration corrector for the prototype segmented mirror telescope // Proc. SPIE. 11 May 2023. 12638. Women in Optics and Photonics in India 2022. V. 1263807. P. 20–24. <https://doi.org/10.1117/12.2669796>
  27. Dharmadhikari R., Parihar P., Jacob A. Building a large affordable optical-NIR telescope (I): an alternate way to handle segmented primary mirror // Exp Astron. 2023. V. 56. P. 569–604. <https://doi.org/10.1007/s10686-023-09900-0>
  - ments in Optical Design and Optical Engineering VIII. <https://doi.org/10.1117/12.368191>
  17. Darragh O'Donoghue, Arek Swat. Spherical aberration corrector of the Southern African Large Telescope (SALT) // Proc. SPIE. 5 February 2002. 4411. Large Lenses and Prisms. <https://doi.org/10.1117/12.454897>
  18. Damien J.J., William E.J. Prime focus correctors for the spherical mirror // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 4384–4388.
  19. Puryayev D.T., Goncharov A.V. Compact two-mirror schemes for telescopes with a fast spherical primary // Opt. Eng. 1 June 2000. V. 39(6). P. 1692–1696. <https://doi.org/10.1117/1.602546>
  20. Puryayev D.T. Concept for a telescope optical system with a 10-m-diam spherical primary mirror // Opt. Eng. 1 July 1996. V. 35(7). <https://doi.org/10.1117/1.600779>
  21. Puryayev D.T., Goncharov A.V. Aplanatic four-mirror system for optical telescopes with a spherical primary mirror // Opt. Eng. 1 August 1998. V. 37(8). P. 2334–2342. <https://doi.org/10.1117/1.602031>
  22. Zverev V.A., Romanova G.E. Optical design of a telescope with a main mirror diameter of 10 m // News of higher educational institutions. Instrumentation. 2008. T. 51. № 5. P. 49–51.
  23. Moretto G, Sebring T.A., Ray F.B., Ramsey L.W. Aplanatic corrector designs for the extremely large telescope // Appl. Opt. 2000. V. 39. P. 2805–2812. <https://doi.org/10.1364/AO.39.002805>
  24. Ackermann M.R., McGraw J.T., Zimmer P.C. Improved spherical aberration corrector for fast spherical primary mirrors // Proc. SPIE 7061. Novel Optical Systems Design and Optimization XI. 11 September 2008. V. 70610I. <https://doi.org/10.1117/12.791666>
  25. Wenbo Yang, Yan Zhao, Ming Liu, Delong Liu. Method of space object detection by wide field of view telescope based on its following error // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 35348–35365. <https://doi.org/10.1364/OE.440842>
  26. Radhika Dharmadhikari, Annu Jacob, Padmakar Parihar. Optical design of FOSC and wide field aberration corrector for the prototype segmented mirror telescope // Proc. SPIE 12638. Women in Optics and Photonics in India 2022. 11 May 2023. V. 1263807. P. 20–24. <https://doi.org/10.1117/12.2669796>
  27. Dharmadhikari R., Parihar P., Jacob A. Building a large affordable optical-NIR telescope (I): an alternate way to handle segmented primary mirror // Exp Astron. 2023. V. 56. P. 569–604. <https://doi.org/10.1007/s10686-023-09900-0>

**АВТОРЫ**

**Владислав Владимирович Дружин** — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Россия; Scopus ID: 23767020500, <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>, [vlad.druzhin@gmail.com](mailto:vlad.druzhin@gmail.com)

**Даниил Трофимович Пуряев** — доктор техн. наук, профессор, пенсионер, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0684-4752>, [daniil.puryaev@gmail.com](mailto:daniil.puryaev@gmail.com)

**AUTHORS**

**Vladislav V. Druzhin** — PhD, Associate Professor, Bauman MSTU, 105005, Moscow, Russia; Scopus ID: 23767020500, <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>, [vlad.druzhin@gmail.com](mailto:vlad.druzhin@gmail.com)

**Daniil T. Puryaev** — Dr.Sc., Professor, Bauman MSTU, 105005, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0684-4752>, [daniil.puryaev@gmail.com](mailto:daniil.puryaev@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 02.12.2023  
Одобрена после рецензирования 20.12.2023  
Принята к печати 29.02.2024

The article was submitted to the editorial office 02.12.2023  
Approved after review 20.12.2023  
Accepted for publication 29.02.2024