

## КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Д. В. КИРИЧЕНКО, В. В. КЛЕЙМЁНОВ, Е. В. НОВИКОВА

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: elena.novikova.51@mail.ru*

Представлен обзор современного состояния и тенденций развития космического телескопостроения за рубежом. Описываются результаты проводимых в настоящее время в ряде стран работ по проектированию и строительству новых высокотехнологических астрономических оптических систем наблюдения за космосом. Основным направлением развития является создание больших оптических телескопов. Такая тенденция связана со стремлением повысить качество получаемых изображений за счет улучшения основных характеристик оптических телескопов, зависящих от размера апертуры телескопа. В связи с этим возрастают требования к материалу и качеству оптических элементов. Приведены сравнительные характеристики оптических материалов, используемых при изготовлении зеркал космических телескопов. Рассмотрены находящиеся на орбите и строящиеся большие оптические телескопы с составными и гибкими зеркалами, управляемыми активными системами с целью устранения деформаций на всех этапах изготовления и эксплуатации.

**Ключевые слова:** *оптические космические телескопы, диаметр апертуры (объектива), деформируемые зеркала, составные сегментные зеркала, активная оптика, оптические материалы, зеркала из карбида кремния*

**Введение.** Значительные научно-технические достижения последнего времени в астрономии при изучении планет, звезд и галактик, исследовании удаленных районов Вселенной, получении изображений космических и наземных объектов с высоким разрешением стали возможными благодаря развитию новых технологий при разработке крупногабаритных космических телескопов. В настоящее время в ряде стран — США, Японии, Канаде, а также в Европейском космическом агентстве (European Space Agency — ESA) ведутся активные работы по созданию трех-, шести- и восьмиметровых оптических телескопов. Это обусловлено тем, что основные характеристики оптических телескопов — собирающая способность, проникающая сила и разрешающая способность, наряду с другими факторами, зависят от размера апертуры телескопа.

Так, проникающая сила и собирающая способность телескопа зависят от площади его объектива, которая при сплошной апертуре пропорциональна квадрату ее диаметра  $D$ . Разрешающая способность в общем случае определяется дифракционным пределом (предложен Рэлеем в 1879 г.)  $\theta_p = 1,22\lambda / D$ , где  $\lambda$  — длина волны.

С увеличением диаметра главного зеркала телескопа увеличивается и его масса, что приводит к проблеме предохранения поверхности зеркала и элементов конструкции телескопа от деформаций. Это особенно актуально для космических оптических телескопов, при создании которых необходимо не только обеспечить требуемую жесткость конструкции при

снижении веса, но и решить проблему сохранения состояния предварительно отъюстированной оптической системы в наземных условиях (на стендах в вертикальном или горизонтальном положении) и априорного учета гравитационной разгрузки при выводе в космос.

Перечисленные требования привели к замене сплошного главного зеркала телескопа составным или сегментным [1—6], к разработке новых материалов для изготовления облегченных зеркал с улучшенными характеристиками (что особенно важно при работе в космическом пространстве) [7] и применению активной оптики для управления формой поверхности зеркала с целью устранения его малых деформаций на всех этапах изготовления и эксплуатации [8, 9].

Система активной оптики впервые была применена в Европейской организации астрономических исследований в Южном полушарии (European Southern Observatory — ESO) в 1980-х гг. в наземном телескопе ESO (New Technology Telescope — NTT) в обсерватории Ла-Силья [9]. Управляемое компьютером главное зеркало телескопа диаметром 3,58 м в ходе наблюдений активно настраивается электроприводами для сохранения оптимального качества получаемого изображения. Вторичное зеркало диаметром 0,875 м может активно перемещаться в трех направлениях. Следует отметить, что система активной оптики телескопа NTT корректирует только деформации поверхности зеркала, вызванные деформацией элементов конструкции телескопа, но не атмосферной турбулентностью (в отличие от систем адаптивной оптики).

**Сравнительный анализ материалов для зеркал космических телескопов.** Изготовление главного зеркала телескопа из современных материалов позволяет в значительной степени облегчить конструкцию. Оптические телескопы больших размеров космического базирования подвергаются неравномерному нагреву, что приводит к локальным деформациям элементов конструкции и поверхности зеркала.

Стремление обеспечить стабильность формы оптической поверхности зеркала космического телескопа в условиях максимального гравитационного и температурного воздействий диктует определенные требования, которым должен удовлетворять применяемый материал, а именно:

- минимальный удельный вес (плотность)  $\rho$ ;
- максимальный модуль упругости  $E$ ;
- минимальный коэффициент теплового расширения  $\alpha$ ;
- максимальная теплопроводность  $\beta$ ;
- высокое качество полированной поверхности, обеспечивающее высокий коэффициент отражения зеркального покрытия;
- стабильность физико-механических свойств во времени.

Сравнительную оценку материалов для зеркал проводят также на основе анализа двух комплексных параметров:

- удельной жесткости  $E/\rho$ , обратно пропорциональной деформации зеркала под действием собственного веса;
- коэффициента термостойкости  $\beta/\alpha$ , обратно пропорционального деформации зеркала при изменении температуры.

В производстве зарубежных телескопов в настоящее время используются стекла, плавленный кварц, стеклокерамика, бериллий, карбид кремния и др.; их характеристики приведены в таблице [10—12].

Наиболее распространенным в настоящее время материалом, из которого изготовлены зеркала крупнейших оптических телескопов, является стеклокерамика церодур (Zerodur), производимый фирмой “Schott” (Германия) с 1968г. При очень низком коэффициенте теплового расширения  $\alpha=0,02 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  церодур может быть использован для изготовления зеркал, которые сохраняют форму при экстремально низких температурах, что особенно важно в условиях

открытого космоса. Поверхность зеркала из церодура покрывают тонким отражающим слоем алюминия. Недостатки церодура — низкая теплопроводность (примерно на 2 порядка ниже, чем у карбида кремния) и малая механическая прочность (удельная жесткость в 4—5 раз ниже, чем у карбида кремния и бериллия, но в 1,5 раза выше, чем у алюминия) [13, 14]. Заметим, что по своим характеристикам, оптическим и физико-механическим свойствам близким к церодуру является ситалл СО-115М, производимый Лыткаринским заводом оптического стекла (Россия), при этом стоимость ситалла примерно на 40 % ниже [12].

Свойство материала	Карбид кремния	Бериллий	Церодур	Ситалл СО-115М	Алюминий
Модуль упругости $E$ , ГПа	420	287	92	92	70
Плотность $\rho$ , кг/дм <sup>3</sup>	3,2	1,9	2,6	2,46	2,7
Коэффициент теплового расширения $\alpha$ , К <sup>-1</sup>	2,2	11,3	0,2	0,15	23,0
Теплопроводность $\beta$ , Вт/(м·К)	180	216	1,6	1,18	167
Коэффициент термостойкости $(\beta/\alpha) \cdot 10^6$ , Вт/м	82	19	80	79	7
Удельная жесткость $(E/\rho) \cdot 10^6$ , м	131	151	35	37	26

Бериллий — относительно твердый материал (уступает по жесткости только иридию, осмию, вольфраму и урану), легкий, обладающий стабильностью и прогнозируемостью свойств при криогенных температурах. Имеет высокий модуль упругости — 300 ГПа (у сталей 200—210 ГПа). На воздухе активно покрывается стойкой оксидной пленкой ВеО. В производстве тепловых экранов и систем наведения ни один конструкционный материал практически не может конкурировать с бериллием. Будучи в 1,5 раза легче алюминия, этот материал в то же время прочнее многих специальных сталей. Однако бериллий — хрупкий металл и весьма токсичен при обработке.

В 1970-х гг. в рамках программы Министерства обороны США и агентства NASA проводились масштабные работы, направленные на создание основных технологий и выбор материала для изготовления крупногабаритных (в том числе, силовых) облегченных охлаждаемых зеркал. Аналогичные широкомасштабные исследования по этой программе проводились во Франции, Германии, США и Японии. Были разработаны критерии сравнительной оценки качества силовой оптики для создания оптических крупногабаритных зеркал широкого спектра назначений. В результате исследований был выявлен ряд преимуществ карбида кремния по сравнению с такими материалами, как стекло, алюминий, бериллий, ситалл и медь [15].

Карбид кремния SiC получается при химической реакции между кварцевым песком и коксом (cokecarbon) при очень высоких температурах. К особым свойствам карбида кремния относятся [15—20]:

- высокая жесткость;
- низкая плотность (крупногабаритное зеркало из карбида кремния, имеющее диаметр более 500 мм, весит в 5—7 раз меньше, чем аналогичное зеркало из ситалла);
- низкая чувствительность к термическим деформациям (низкое тепловое расширение и высокая теплопроводность);
- высокая термическая стабильность;
- пониженная хрупкость;
- незначительное уменьшение объема (усадка) в процессе обработки.

Этот новый материал уже используется для изготовления сверхлегких зеркал и монолитных опорных структур для космических применений, а в перспективе может быть использован в качестве структурного основания (подложки) в больших зеркалах.

Однако при создании монолитных оптических структур большого размера (более 1 м) возникают проблемы с качеством обработки поверхностей. Решением в этом случае является создание сегментов меньшего размера и последующее их спекание (синтерирование). Непосредственно спеченный (синтерированный) карбид кремния (SSiC) — перспективный

материал для изготовления сегментированных облегченных вогнутых зеркал [21]. Использование карбида кремния при изготовлении оптических телескопов, как отмечено выше, позволит в значительной степени снизить их вес и габариты: так, зеркало диаметром 1,2 м будет весить 60—70 кг, а диаметром 2,4 м — 200 кг.

**Космический телескоп Хаббл** (Hubble Space Telescope — HST). Хронологию создания крупногабаритных оптических телескопов следует начать, пожалуй, с первого спутника видовой разведки США — КН-11, выведенного на околоземную орбиту на высоте 569 км в 1976 г. С этого времени было запущено несколько улучшенных модификаций КН-11. Информация о них в основном закрыта Национальным управлением военно-космической разведки США, и публикаций крайне мало. Конструкция КН-11 была модифицирована для создания космического телескопа, названного в честь астронома Э. Хаббла, с главным монолитным зеркалом диаметром 2,4 м, изготовленным из кварца. Телескоп был запущен на околоземную орбиту в 1990 г. Это один из самых мощных посещаемых космических телескопов, работающих в видимой части спектра. Его разрешающая способность в 7—10 раз выше, чем была бы при наземном размещении из-за влияния атмосферной турбулентности. Описанию конструкции телескопа и изображений, полученных с его помощью в диапазоне от ультрафиолетового (УФ) до ближнего инфракрасного (ИК), посвящено множество работ. Для устранения погрешности сборки, обнаруженной сразу после вывода телескопа на околоземную орбиту, была разработана и изготовлена система COSTAR, установленная во время первого посещения и технического обслуживания в 1993 г. В дальнейшем было проведено еще четыре экспедиции к телескопу (в 1997, 1999, 2002 и 2009 гг.), имевшие своими задачами замену, усовершенствование, восстановление и дополнение различных систем и приборов. Так как все бортовые приборы получили в ходе ремонта встроенные средства корректировки погрешности установки главного зеркала, необходимость системы COSTAR отпала.

По окончании последней экспедиции к телескопу в 2009 г. было решено продлить его работу на орбите до 2014 г., когда к нему должен был присоединиться, а потом и заменить его создаваемый агентством NASA новый космический телескоп JWST. Однако эти планы по различным причинам были сорваны. После 25-летней работы космического телескопа Хаббл на орбите его дальнейшее обслуживание агентством NASA не планируется. На сегодняшний день телескоп Хаббл по-прежнему остается самым большим космическим телескопом, работающим в диапазоне излучения от УФ до ближнего ИК [22, 23].

В 2016 г. астрономами, работающими с телескопом Хаббл, было определено расстояние до самой удаленной галактики во Вселенной — 13,4 млрд световых лет от Земли. На сегодняшний день это самая далекая и древняя галактика среди всех других, известных людям. Галактика GN-z11 сформировалась спустя 400 млн лет после момента Большого взрыва, который считается временем образования Вселенной. Впервые расстояние до столь удаленного объекта было измерено по его спектру при помощи спектрографа телескопа Хаббл, что обеспечило высокую степень достоверности данных [24].

Так как излучение большинства удаленных космических объектов находится в инфракрасной области спектра, то для их изучения был создан ряд ИК-телескопов.

**Космический телескоп Спитцер** (Spitzer Space Telescope). Космический телескоп, названный по имени американского астрофизика Л. Спитцера [25], был выведен на орбиту в 2003 г. и на момент запуска был первым и крупнейшим в мире космическим ИК-телескопом. Главное зеркало телескопа Спитцер диаметром 85 см изготовлено из бериллия и охлаждается до 5,5 К. Телескоп оснащен тремя приборами, которые позволяют выполнять астрономические наблюдения (получение изображения) и фотометрию в спектральном диапазоне от 0,3 до 180 мкм, спектроскопию — в диапазоне от 5 до 40 мкм и спектрофотометрию — в диапазоне от 5 до 100 мкм.

Планируемый период работы был определен в 2,5 года с возможностью продления срока до 5 лет (или дольше), пока не будет истощен бортовой запас хладагента — жидкого гелия. Это случилось 15 мая 2009 г. Без жидкого гелия для охлаждения телескопа до очень низких температур, необходимых для его работы, большинство устройств становились непригодными. Основная миссия телескопа Спитцер на этом завершилась, однако часть приборов продолжает работу. Его приемником стал космический телескоп Гершель.

**Космический телескоп Гершель** (Herschel Space Observatory). Телескоп Гершель (по имени английского астронома У. Гершеля) [20, 26] — первая космическая обсерватория для полномасштабного изучения ИК-излучения в космосе. Этот проект ESA — самый большой и самый мощный ИК-телескоп, охватывающий спектральную область от дальней инфракрасной до субмиллиметровых длин волн (от 60 до 670 мкм), которые генерируются самыми холодными объектами во Вселенной.

Телескоп Гершель 14 мая 2009 г. был выведен на гелиоцентрическую орбиту вблизи второй точки Лагранжа ( $L_2$ ) системы Земля—Солнце (1,5 млн км от Земли). Это область пространства, где гравитации Солнца и Земли находятся в балансе, позволяя космическому аппарату „парить“ неограниченно долго, только время от времени сжигая топливо двигателя для поддержания своего местоположения (рис.1) [27].

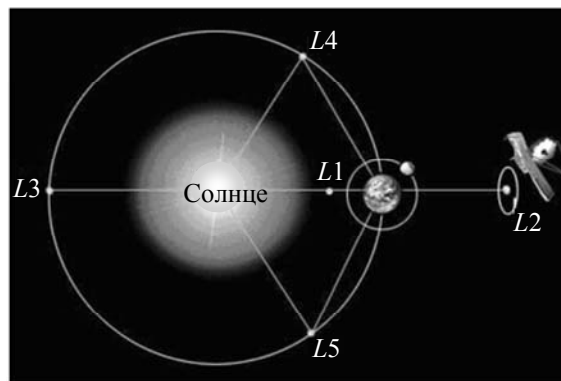


Рис. 1

Точки Лагранжа, названные по имени их первооткрывателя Дж. Лагранжа, — это пять особых точек вокруг двух вращающихся по орбите тел, гравитация которых позволяет третьему более мелкому телу вращаться по своей орбите на фиксированном расстоянии от первых двух более крупных тел (Солнца и Земли). Размещение телескопа на гелиоцентрической орбите во второй точке Лагранжа и охлаждение инфракрасных датчиков жидким гелием до 2 К, наряду с постоянным прикрытием телескопа от Солнца тенью земного шара, позволило ученым заглянуть в отдаленные и очень холодные уголки Вселенной, недоступные другим телескопам. Диаметр монолитного главного зеркала телескопа 3,5 м — это самое большое среди зеркал космических телескопов, его вес 315 кг при толщине всего 20 см. Деформация волнового фронта удерживалась ниже среднеквадратического значения 6 мкм, несмотря на рабочую температуру 80 К.

Материал для зеркала — карбид кремния, физические свойства которого позволяют контролировать форму зеркала с точностью до 10 мкм. Время работы спутника на орбите определялось количеством гелия на его борту (2300 л). Продолжительность работы по плану была определена в 3 года.

29 апреля 2013 г. во время сеанса связи с космическим аппаратом ученые получили данные о том, что запас жидкого гелия, который в течение четырех лет медленно испарялся, удерживая температуру камер на уровне 27 °С ниже нуля, закончился. В результате телескоп Гершель прослужил 3 года 11 месяцев и 15 дней.

Специалисты ESA рассматривали две возможности — отправить космический аппарат с телескопом Гершель на гелиоцентрическую орбиту, где он не встретится с Землей еще несколько сотен лет, или разбить его о лунную поверхность. Последний вариант был бы повторением эксперимента, проведенного с запущенным агентством NASA в 2009 г. аппаратом LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite — космическим аппаратом для наблюдения и зондирования лунных кратеров) и разгонным блоком „Центавр“, которые были специально разбиты о лунную поверхность в районе Южного полюса. В результате падения телескопа поднявшийся шлейф газа и обломков позволил бы получить новые данные о составе поверхности Луны в области вечной тени и, в частности, определить наличие там воды и других летучих веществ. Этот проект прорабатывался группой из 30 ученых Оксфордского университета. В ноябре 2012 г. планировалось определить возможные места для удара, но в итоге было выбрано первое решение — перевод на гелиоцентрическую орбиту как более дешевый вариант. 17 июня 2013 г. научная миссия телескопа Гершель была официально завершена. Он был выведен на орбиту вокруг Солнца, на которой останется навсегда. На смену телескопу Гершель Японское аэрокосмическое агентство (JAXA) готовит телескоп SPICA.

**Космический телескоп Спика** (SPICA — Space InfraRed Telescope for Cosmology and Astrophysics). Космический инфракрасный телескоп для космологов и астрофизиков SPICA — астрономический проект следующего поколения. Комплекс SPICA — это программа, оптимизированная для астрономических наблюдений в средней и дальней инфракрасной ИК-области спектра, выполняемая телескопом с криогенным охлаждением [28—30]. SPICA, как и Гершель, — телескоп с монолитным зеркалом диаметром более 3 м, изготовленным из карбида кремния.

Телескоп SPICA будет выведен на орбиту при температуре внешней среды и охлажден на орбите с помощью системы бортовых механических криоохладителей (вместо жидкого гелия), которая позволит иметь космический телескоп трехметрового класса, охлажденный до температуры 4,5 К, с умеренным общим весом, равным 3,7 т [29]. Это, в свою очередь, обеспечит высокую чувствительность в инфракрасном диапазоне излучения. Телескоп предназначен для наблюдения в более длинноволновой области ИК-диапазона, чем телескоп JWST, что позволит обратиться к решению множества ключевых проблем современной астрономии.

Основная задача космического телескопа SPICA — изучение процессов формирования звезд и планет. Он будет способен обнаружить звездные образования галактик, а наличие собственного коронографа поможет найти протопланетарные диски вокруг молодых звезд и экзопланеты. Время его работы на орбите — пять лет. В основном режиме работы космический телескоп будет находиться во второй точке Лагранжа  $L_2$ . В 2009 г. предположительным временем запуска телескопа на орбиту назывался 2017 г. [28]. Однако, согласно новым сведениям, окончательный срок запуска перенесен на 2022-й или даже на 2025 г. [29, 30].

**Космический телескоп Гея** (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics — Gaia). Космический телескоп Гея — проект ESA [26, 31, 32] — был выведен на орбиту 19 декабря 2013 г. с космодрома во Французской Гвиане. Главная задача телескопа — составить подробную трехмерную карту распределения около миллиарда звезд Галактики Млечный Путь с указанием их координат, направления движения и цвета.

Оптическая схема Геи представляет собой два зеркальных телескопа, каждый из которых содержит шесть зеркал; размер главных зеркал каждого телескопа —  $1,46 \times 0,51 \text{ м}^2$ .

Фокальные плоскости телескопов совмещены, при этом цифровая обработка изображения, сформированного каждым телескопом, осуществляется отдельно. Ряд приемных устройств дополнительно оснащен набором дифракционных решеток. Сканирование пространства осуществляется вращением телескопа. Телескоп Гея оснащен большим разворачиваемым экраном площадью в  $100 \text{ м}^2$ , обеспечивающим тепло- и светозащиту.

Телескоп Гейя изготовлен более чем из 280 карбид-кремниевых элементов 80 различных типов. Самые важные из них — это высокостабильные конструкции, имеющие форму тора размером 3 м. Система крепления зеркал представляет собой полое кольцо, имеющее форму квазимоногранника и состоящее из 19 карбид-кремниевых элементов, спаянных вместе.

Телескопы Гершель и Гейя — два наиболее престижных проекта Европейского космического агентства [26]. Эти приборные комплексы требуют высокой термической стойкости и механической прочности, которые способна обеспечить только карбид-кремниевая конструкция.

8 января 2014 г. аппарат успешно достиг своей целевой орбиты в точке Лагранжа  $L_2$ . Последующие четыре месяца продолжалось тестирование и калибровка бортовых приборов аппарата.

**Космический оптический телескоп Джеймса Уэбба (JWST — James Webb Space Telescope).** Космический телескоп Джеймса Уэбба — это результат международного сотрудничества 17 стран, во главе которых стоит NASA, со значительным вкладом Европейского и Канадского космических агентств. Его стоимость составила 8,8 млрд долл. Первоначально назывался „Космический телескоп нового поколения“ (Next-Generation Space Telescope — NGST) [33—35]. В 2002 г. был переименован в честь второго руководителя NASA Джеймса Уэбба, возглавлявшего агентство в 1961—1968 гг. В 2018 г. телескоп JWST собираются вывести на орбиту в точку Лагранжа  $L_2$  системы Земля—Солнце. Рабочий диапазон длин волн от 0,6 до 28,5 мкм охватывает видимую и инфракрасную области спектра.

Телескоп JWST будет работать при температуре около 40 К, которая обеспечивается пассивным охлаждением всего комплекса посредством большого пятислойного мембранного противосолнечного экрана (щита) размером с теннисный корт. Экран будет защищать телескоп от нагрева, и с его помощью можно изучать космос в инфракрасной области спектра [34]. Собирающая площадь JWST равна 25 м<sup>2</sup>, в пять раз больше собирающей площади телескопа Хаббл, хотя ожидаемая масса зеркала равна примерно половине массы телескопа Хаббл. Оптическая конструкция телескопа — трехзеркальный плананастигмат. Кроме того, для обеспечения стабильности положения изображения имеется зеркало, сканирующее с достаточно большой частотой.

Главное зеркало телескопа размером 6,5 м — составное из 18 гексагональных сегментов (рис. 2) [36]. Размер каждого сегмента 1,32 м (от ребра до ребра), а его масса 20 кг. Симметричная схема размещения сегментов, имеющих шестиугольную форму и расположенных без зазоров, обеспечивает высокий коэффициент заполнения апертуры. Благодаря симметрии расположения предусмотрены только три независимых этапа настройки для 18 сегментов (по 6 сегментов при одном этапе настройки).

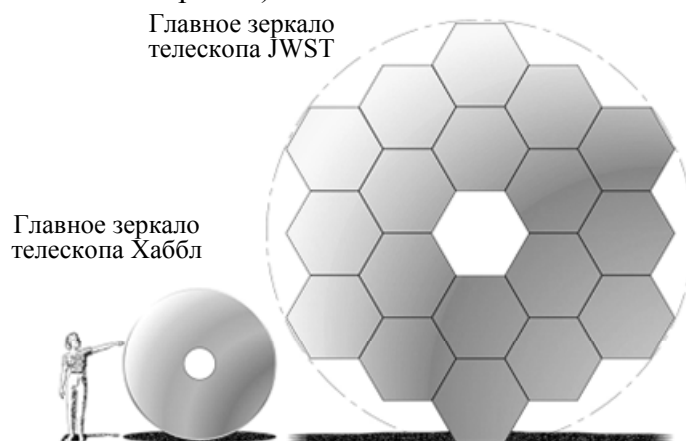


Рис. 2

В процессе работы над проектом были исследованы и изготовлены новые конструкции зеркала: два тестовых зеркала из бериллия и специального стекла. В результате экспертизы для телескопа JWST выбрано зеркало из бериллия.

Для изготовления зеркальных сегментов используется особый тип бериллия — мелкий порошок, который помещается в контейнер из нержавеющей стали и прессуется в плоскую форму. После извлечения из контейнера заготовка бериллия разрезается пополам, размер стороны каждой из двух полученных квадратных заготовок равен 1,32 м. Каждая заготовка зеркала используется для создания одного сегмента [33, 37—40]. Толщина каждой бериллиевой зеркальной подложки приблизительно 5 см, ее отражающая поверхность тщательно отполирована до средней шероховатости 20 нм, а задняя сторона имеет вид „ячеистой упаковки для яиц“ для уменьшения веса, но сохранения прочности. После завершения обработки сегмента поверхность зеркала покрывается тонким слоем золота, отражающим инфракрасное излучение в диапазоне длин волн 0,6—28,5 мкм. После этого зеркала подвергаются испытаниям при криогенных температурах. Подобным же образом изготавливаются второе и третье зеркала [33, 37, 38].

В монолитном исполнении главное зеркало (диаметром 6,5 м) было бы невозможно доставить на орбиту в ракете-носителе из-за ее ограниченных размеров. Поэтому главное зеркало составлено из элементов, которые могут поместиться в ракете, а в космосе будут раскладываться.

После вывода телескопа на орбиту он будет развернут и испытан до начала наблюдений. Энергия, вырабатываемая солнечными батареями, обеспечит требуемую мощность. Результаты контроля волнового фронта в плоскости изображения посредством восстановления фазы будут использоваться для установки зеркальных сегментов в требуемое положение с помощью точных приводов. Приводы — это миниатюрные механизмы, прикрепленные к задней стороне каждого зеркального элемента, состоящие из микроэлектродвигателей и передаточных механизмов, используемых для сдвига элементов и изменения формы отражающей поверхности зеркала. Приводы выравнивают 18 сегментов главного зеркала так, чтобы сфокусировать его на объект в космосе. Состояние всех компонентов оптической части телескопа (на 2014 г.) и план завершения работ представлены в работе [33].

После того как телескоп будет раскрыт в космосе и охлажден до рабочих температур, с Земли будет дана команда для приведения в действие всех приводов и выравнивания всех сегментов относительно опорной поверхности телескопа. Этот процесс займет примерно два месяца. Затем, когда телескоп придет полностью в рабочее состояние, юстировка зеркала будет проводиться примерно раз в 10—14 дней. Благодаря этой новой технологии телескоп JWST будет первой космической обсерваторией, использующей активно управляемое сегментированное главное зеркало. Активная оптика телескопа реализует принцип работы „установить и забыть“ („set-and-forget“).

**Космический оптический телескоп ATLAST** (Advanced Technology Large Aperture Space Telescope). Для получения изображений космических объектов с более высоким разрешением и для решения будущих задач необходимо создание телескопов с еще большей апертурой, превышающей 10 м, что диктует особые требования к размеру, весу и мощности средств выведения телескопа в космос, а также к стоимости и технологии сборки полной апертуры. Решение этой задачи предусмотрено в телескопе JWST. Одним из вариантов подхода к построению большого телескопа является разработка „Эволюционирующего космического телескопа“, апертура которого первоначально равна 3—4 м, что позволит вывести его на орбиту. Затем телескоп будет пополняться зеркальными сегментами, конструкционными узлами и элементами и более новыми приборами и инструментами для „эволюции“ телескопа и достижения характеристик 16-метрового или еще большего космического телескопа [41, 42].

Агентство NASA рассматривает возможность построения в 2025—2035 гг. нового большого космического телескопа. Амбициозная научная программа эксплуатации будущего телескопа включает получение прямых изображений и спектроскопию подобных Земле планет,



вращающихся вокруг других звезд, разрешение отдельных звезд из ближайших галактик и исследование наиболее удаленных районов обозреваемой Вселенной.

Телескоп ATLAST предназначен для работы в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (110—2400 нм) излучения. Дата выведения на орбиту предварительно определена на 2029—2030 гг. Так же как и JWST, телескоп ATLAST будет расположен в точке Лагранжа  $L_2$  системы Земля—Солнце. Первоначально существовало несколько вариантов конструкции зеркальной системы телескопа. Диаметр главного зеркала варьировался в пределах от 8 до 16,8 м. Позднее были определены две концепции построения телескопа: первая — с монолитным главным зеркалом диаметром 8 м, вторая — с составным главным зеркалом (диаметром 9,2 м или 16,8 м), состоящим из множества сегментов. Монолитное зеркало — сегментированное, ракета-носитель — Ares V либо Evolved Expendable Launch Vehicle (EELV), пассивный или полноценный активный контроль волнового фронта и т.д. [43—46].

К примеру, 8-метровое зеркало имеет преимущества, характерные для телескопов с монолитными зеркалами, в виде более высокой контрастности изображения и более удобного контроля волнового фронта; 16-метровое зеркало имеет все преимущества, характерные для телескопов с большой площадью собирающей поверхности. ATLAST должен будет иметь угловое разрешение в 5—10 раз лучше, чем у JWST, и чувствительность в 2000 раз лучше, чем у телескопа Хаббл.

Одна из возможных схем построения [44] ATLAST-9,2м, показанная на рис. 3, состоит из телескопа с составной апертурой диаметром 9,2 м; здесь используются схема и принципы работы телескопа JWST.

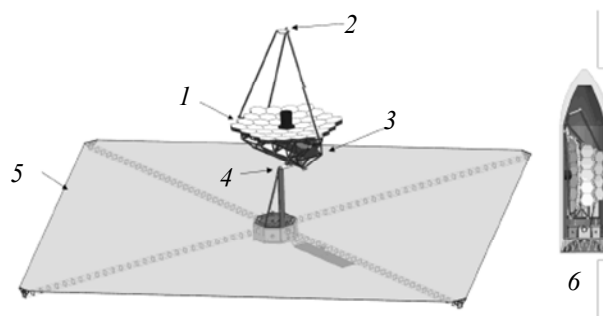


Рис. 3

Главное зеркало 1 состоит из 36 сегментов (таких же, как в проекте JWST), изготовленных из стекла или карбида кремния. Нагревательные пластинки на сегментах используются для поддержания термической стабильности. Вторичное зеркало 2 — активно управляемое в шести степенях свободы по результатам измерений, осуществляемых блоком научных приборов 3. Научные приборы доступны для внешнего обслуживания. Телескоп изолирован от космического аппарата посредством неконтактной системы точечных подвесов 4. Способ монтажа подвесов обеспечивает постоянство угла обзора между трехслойным солнечным щитом 5 и Солнцем, а также стабильность температуры корпуса. Сегменты главного зеркала будут свернуты при запуске космического аппарата и развернуты при его выводе на орбиту. Это позволит разместить весь оптический телескоп внутри 5-метрового корпуса ракеты 6.

Первоначальная архитектура телескопа ATLAST с 16-метровой апертурой аналогична основной конфигурации JWST [43, 46]. Предполагается, что после того, как ATLAST-16м будет выведен на орбиту (после 2027 г.), JWST завершит свою миссию. Опыт его создания будет использован при разработках подобных устройств, структур и подсистем для ATLAST-16м (или A16), который также будет оснащен активно управляемой оптической системой с деформируемыми зеркальными сегментами. В работах [43, 46] представлена предварительная схема активной оптики, использующей облегченные деформируемые зеркальные сегменты, систему определения степени деформации и управления волновым фронтом, систему

поддержания волнового фронта на основе измерений, систему термоконтроля (терморегуляции) сегментов, бортовую и наземную системы обработки данных для обеспечения высокого уровня качества изображения.

При создании телескопа ATLAST-16м предполагается использовать систему активной оптики телескопа JWST, но будут предприняты определенные действия по ее совершенствованию. JWST будет работать в основном в спектральном диапазоне инфракрасного излучения, поэтому поверхность его зеркала будет обработана таким образом, чтобы получить дифракционное качество изображения космических объектов при  $\lambda = 2000$  нм. А так как ATLAST-16м будет работать и в видимом диапазоне длин волн, и частично в ультрафиолетовом, это потребует более высокого качества обработки зеркала для достижения дифракционного качества изображения при  $\lambda = 500$  нм. В режиме коронографа качество изображения должно быть даже намного лучше для обеспечения требуемой контрастности, для чего потребуется достижение экстремально хорошего качества и стабильности волнового фронта (ошибка волнового фронта меньше  $0,001\lambda$ ) [46].

При построении телескопа ATLAST-16м предполагается, что главное зеркало будет состоять из облегченных сегментов размером от 2 м и более в зависимости от технологии изготовления и возможностей активной оптики [47, 48]. Система управления волновым фронтом будет использована как для начального устранения деформаций зеркала, так и для периодического управления его формой. Так же как и в телескопе JWST, в телескопе ATLAST-16м в системе активной оптики будет реализован принцип „установить и забыть“. Авторы работ [43, 46] делают вывод, что активное управление сегментами главного зеркала телескопа A-16 обеспечит способность компенсировать ошибки оптики, которые могут проявиться в процессе изготовления, сборки и вывода телескопа на орбиту или в ходе работы на орбите.

Моделирование показало, что система измерения деформаций и система управления волновым фронтом способствуют уменьшению больших начальных (исходных) деформаций волнового фронта (6 мм) до очень малых величин (13 нм). Остаточные деформации волнового фронта в процессе наблюдения, как ожидается, должны сохраняться на уровне менее 20 нм.

Для контроля управления волновым фронтом по всему угловому полю телескопа предполагается использование лазерных дистанционных эталонов. Схема полного трехмерного лазерного пучка представлена на рис. 4 [46]. С помощью лазерного пучка с частотой не менее 1 кГц на основе методов интерферометрии совместно с системой слежения за звездами и системой гироскопов будут определены как деформации волнового фронта, так и положение линии визирования (оптической оси) телескопа в пространстве.

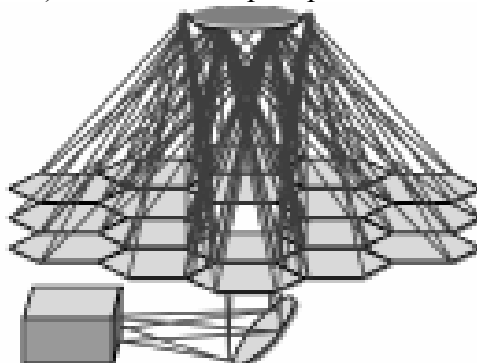


Рис. 4

Активный температурный контроль основных оптических элементов, прежде всего сегментов главного зеркала и вторичного зеркала для сохранения их формы, позволит снизить необходимость частого контроля их деформаций. В системе терморегуляции каждого сегмента используются подсоединенные к ним датчики температуры совместно с нагревательным устройством для поддержания постоянной температуры (отклонения меньше  $1^\circ\text{C}$ ). В составе

телескопа предусмотрена комплексная встроенная обработка данных (на борту) с использованием результатов измерений деформаций волнового фронта, метрологических данных, температуры и определения местоположения КА, осуществляемых устройством оценивания состояния оптики. Это устройство использует фильтр Калмана для оптимального управления волновым фронтом, чтобы обеспечить его высокостабильную форму, а также положение линии визирования даже в изменяющихся температурных условиях [49].

**Заключение.** За последние 40 лет в области создания крупногабаритных оптических телескопов достигнут значительный прогресс. В своем развитии они прошли путь от первых телескопов, созданных в интересах Министерства обороны США для космических аппаратов видовой разведки КН-11, до разработанных для NASA с целью решения различных астрономических задач телескопов Хаббл, Спитцер, Гершель, Гейя и запланированных к выводу в космос телескопов JWST (в 2018 г.), SPICA (после 2022 г.) и ATLAST (после 2027 г.).

Несмотря на различия конструкций, общими тенденциями при их создании являются следующие факторы.

1. Переход от неизменной поверхности зеркала к управляемой — прежде всего, к составным или сегментным апертурам. Это позволит не только уменьшить его вес, но и решить проблему размещения зеркала диаметром более 6 м внутри корпуса ракеты при ее запуске в космос. Для этого сегменты главного зеркала телескопов будут складываться перед выводом на орбиту и разворачиваться в космосе. Такая технология будет реализована в телескопах JWST (диаметром 6,5 м) и ATLAST (диаметром 9 и 16 м).

2. Изготовление зеркал из современных материалов позволяет в значительной степени облегчить их конструкцию. Одним из наиболее перспективных материалов является карбид кремния и его разновидности, что объясняется его высокой жесткостью, термической стабильностью и низкой плотностью. Именно поэтому космические телескопы Гершель, SPICA (диаметр апертур обоих — 3,5 м) и Гейя изготовлены из данного материала. Для перспективных 9- и 16-метровых телескопов ATLAST в качестве материала для зеркала также рассматривается карбид кремния.

3. Для управления формой поверхности зеркала с целью устранения деформаций волнового фронта, которые могут возникнуть в процессе его изготовления, сборки, вывода телескопа на орбиту и в полете в условиях динамических температурных и гравитационных воздействий, самое широкое использование находит активная оптика — без ее применения невозможно добиться высокого качества изображения космических объектов в УФ, видимом и ИК-диапазонах.

Очевидно, что разрабатываемые современные технологии находят применение и при создании космических оптических телескопов военного назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chanan G., MacMartin D. G., Nelson J., Mast T. Control and alignment of segmented-mirror telescopes: matrices, modes, and error propagation // *Applied Optics*. 2004. Vol. 43, N 6. P. 1223—1232.
2. Edeson R., Aglietti G. S., Tatnall A. R. L. Conventional stable structures for space optics: the state of the art // *Acta Astronaut.* 2010. Vol. 66. P. 13—32.
3. Hickey G., Barbee T., Ealey M., Redding D. Actuated hybrid mirrors for space telescopes // *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7731. P. 773120—1—12.
4. Lillie C. F., Polidan R. S., Dailey D. R. Key enabling technologies for the next generation of space telescopes // *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7731. P. 773102—09.
5. Feinberg L., Cohen L., Dean B., Hayden W., Howard J., Keski-Kuha R. Space telescope design considerations // *Optical Engineering*. 2012. Vol. 51, N 1. P. 011006—1—10.

6. Клейменов В. В., Новикова Е. В. Наземные и космические адаптивные оптические телескопы // Оптич. журн. 1998. Т. 65, № 6. С. 3—15.
7. Matson L. E., Mollenhauer D. H. Advances materials and process for large, lightweight spacebased mirrors // The AMPTIAC Quarterly. 2004. Vol. 8, N 1. P. 67—74.
8. Love G., Saxena A. K. Active and adaptive optics for the new generation of large telescopes // Current Science. 1994. Vol. 66, N 5. P. 349—355.
9. Laslandes M., Ferrari M., Hugot E., Lemaître G. In-flight aberrations corrections for large space telescopes using active optics // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7739. P. 77393A—1—12.
10. Zhang Ge, Zhao Rucheng, Zhao Wenxing. Fabrication technique of large-scale lightweight SiC space mirror // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6721. P. 67210B—1—5. DOI: 10.1117/2.1201607.006582.
11. Haeng-Bok Lee, Jin-Young Suk, Jong-In Bae. Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structures for spaceborne telescopes // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9574. P. 95740D—1—12.
12. Abdulkadyrov M. A., Belousov S. P., Patrikeev V. E., Semenov A. P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7739. P. 77390P—1—10.
13. Jedamzik R., Kunisch C., Westerhoff T. ZERODUR: progress in CTE characterization // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8860. P. 88600P—1—8.
14. Hull T., Westerhoff T. Extreme lightweight ZERODUR mirrors (ELZM): supporting characteristics for spaceborn applications // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 91431V—1—11.
15. Williams S., Deny P. Overview of the production of sintered SiC optics and optical sub-assemblies // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5868. P. 586804. DOI:10.1117/12.617824.
16. Castel D., Sein E., Lorez S., Nakagawa T., Bougoin M. The 3.2m all SiC telescope for SPICA// Proc. SPIE. 2012. Vol. 8450. P. 84502P—1—13.
17. Kotani M., Imai T., Katayama H., Yui Y., Tange Y., Kaneda H., Nakagawa T., Enya K. Quality evaluation of spaceborne SiC mirrors (I): analytical examination of the effects on mirror accuracy by variation in the thermal expansion property of the mirror surface // Applied Optics. 2013. Vol. 52, N 20. P. 4797—4805.
18. Kotani M., Imai T., Katayama H., Yui Y., Tange Y., Kaneda H., Nakagawa T., Enya K. Quality evaluation of spaceborne SiC mirrors (II): evaluation technology for mirror accuracy using actual measurement data of samples cut out from a mirror surface // Applied Optics. 2013. Vol. 52, N 26. P. 6458—6466.
19. Kaneda H., Onaka T., Kawada M., Murakami H. Cryogenic optical testing of sandwich-type silicon carbide mirrors // Applied Optics. 2003. Vol. 42, N 4. P. 708—714.
20. Sein E., Toulemont Y., Safa F., Duran M., Deny P., Chambure D. de, Passvogel T., Pilbratt G. L. A 3.5 m SiC telescope for Herschel mission // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4850. P. 606—618.
21. Bath D. A., Spain D., Ness E., Williams S., Bougoin M. Evaluation of segmented and brazed mirror assemblies // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5868. P. 586805—1—8.
22. Hanisch R. J. Image restoration for Hubble Space Telescope // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2198. P. 1349—1354.
23. Cox C., Lallo M. Keeping the Hubble Space Telescope in focus // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8442. P. 844237—1—7.
24. Hubble Breaks Cosmic Distance Record [Электронный ресурс]: <<http://www.spacetelescope.org/news/heic1604/>>, 2016.
25. Ingalls J. G., Carey S. J., Lowrance P. J., Grillmair C. J., Stauffer J. R. Using drift scans to improve astrometry with Spitzer // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 91431M—1—11.
26. Bougoin M., Lavenac J. From HERSCHEL to GAIA, 3-meter class SiC space optics // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8126. P. 81260V—1—9. DOI:10.1117/12.893704.
27. Meet the James Webb Space Telescope, Time Machine Extraordinaire [Электронный ресурс]: <<http://astrobob.areavoices.com/2013/06/16/meet-the-james-webb-space-telescope-time-machine-extraordinaire/>>, 2013.
28. Nakagawa T., SPICA Working Group. SPICA: space infrared telescope for cosmology and astrophysics // Advances in Space Research. 2004. Vol. 34. P. 645—650.

29. Nakagawa T., Shibai H., Onaka T., Matsuhara H., Kaneda H., Kawakatsu Y., Roelfsema P. The next-generation infrared astronomy mission SPICA under the new framework // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 91431I—1—9.
30. Nakagawa T., Matsuhara H., Kawakatsu Y. The next-generation infrared space telescope SPICA // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8442. P. 84420O—1—9.
31. Prusti T. Gaia: scientific in-orbit performance // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 914310—1.
32. Mora A., Vosteen A. Gaia in-orbit realignment: overview and data analysis // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8442. P. 84421Q—1—14.
33. Clampin M. Recent progress with the JWST Observatory // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 914302—1—5.
34. Lightsey P. A., Atkinson C., Clampin M., Feinberg L. D. James Webb Space Telescope: large deployable cryogenic telescope in space // Optical Engineering. 2012. Vol. 51, N 1. P. 011003—011003—20.
35. Scott Acton D., Scott Knight J., Contos A., Grimaldi S., Terry J., Lightsey P., Barto A., League B., Dean B., Scott Smith J., Bowers Ch., Aronstein D., Feinberg L., Hayden W., Comeau T., Soummer R., Elliott E., Perrin M., Starr C. W. Wavefront sensing and controls for the James Webb Space Telescope // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8442. P. 84422H—1—11.
36. Killian M. James Webb Space Telescope Flight Instruments and Primary Mirror Segments Ready for Assembly [Электронный ресурс]: <<http://www.americaspace.com/?p=51561>>.
37. Atkinson C., Texter S., Keski-Kuha R., Feinberg L. Status of the JWST optical telescope element // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9904. DOI:10.1117/12.2232649.
38. Matthews G. W., Whitman T. L., Feinberg L. D., Voyton M. F., Lander J. A., Keski-Kuha R. JWST telescope integration and test progress // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9904. DOI:10.1117/12.2232040.
39. Feinberg L., Voyon M., Lander J., Keski-Kuha R., Matthews G. James Webb Space Telescope optical telescope element/integrated science instrument module (OTIS) status // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9904. DOI:10.1117/12.2231453.
40. Glassman T., Levi J., Liepmann T., Hahn W., Bisson G., Porpora D., Hadjimichael Th. Alignment of the James Webb Space Telescope optical telescope element // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9904. DOI:10.1117/12.2233792.
41. Polidan R. S., Breckinridge J. B., MacEwen H. A., Flannery M. R., Dailey D. R. An evolvable space telescope for future astronomical missions // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 914319—1—10.
42. Redding D. C., Feinberg L., Postman M., Stahle C., Thronson H. Beyond JWST: performance requirements for a future large UVOIR space telescope // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9143. P. 914312—1—10.
43. Redding D. C., Hickey G., Agnes G., Eisenhardt P., Green J. J., Krist J., Peterson L., Stapelfeldt K., Traub W., Unwin S., Werner M. Active optics for a 16-meter Advanced Technology Large Aperture Space Telescope [Электронный ресурс]: <[http://www.stsci.edu/institute/atlast/documents/Redding\\_23-ATLAS16\\_SPIE\\_v7.pdf](http://www.stsci.edu/institute/atlast/documents/Redding_23-ATLAS16_SPIE_v7.pdf)>.
44. Thronson H., Bolcar M. R., Crooke J., Feinberg L., Oegerle W., Rioux N., Stahl H. P., Stapelfeldt K. Path to a UV/optical/IR flagship: review of ATLAST and its predecessors // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2016. Vol. 2, N 4. P. 041210. DOI:10.1117/1.JATIS.2.4.041210.
45. Postman M., Brown T., Sembach K., Giavalisc M., Traub W., Stapelfeldt K., Calzetti D., Oegerle W., Rich M. R., Stahl P. H., Tumlinson J., Mountain M., Soummer R., Hyde T. Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope: science drivers and technology developments // Optical Engineering. 2012. Vol. 51, N 1. P. 011007—011007—12.
46. Bolcar M. R., Balasubramanian K., Clampin M., Crooke J., Feinberg L., Postman M., Quijada M., Rauscher B., Redding D., Rioux N., Shaklan S., Stahl H. P., Stable K., Thronson H. Technology development for the Advanced Technology Large Aperture Space Telescope (ATLAST) as a candidate large UV-Optical-Infrared (LUVOIR) surveyor // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9602. P. 960209—1—14.
47. Alaluf D., Bastais R., Wang K., Horodincu M., Burda I. et al. Bimorph mirrors for adaptive optics in space telescopes // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. DOI:10.1117/12.2231702.
48. Abdula P. A., Tolstoba N. D. Comparing and analysis of design lightweight large mirrors for space basing // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9889. DOI:10.1117/12.2227889.
49. Butova D. V., Tolstoba N. D., Fleysher A. G., Orekhova M. K. Optimization of the parameters of space-based mirrors // Proc. SPIE. 2017. Vol. 10100. DOI:10.1117/12.2251230.

**Сведения об авторах**

- Дмитрий Валерьевич Кириченко** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт; начальник управления
- Виктор Владимирович Клеймёнов** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт; главный научный сотрудник; E-mail: klevik2014@yandex.ru
- Елена Владимировна Новикова** — ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт; старший научный сотрудник; E-mail: elena.novikova.51@mail.ru

Рекомендована  
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
18.04.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Кириченко Д. В., Клеймёнов В. В., Новикова Е. В. Крупногабаритные оптические космические телескопы // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 589—602.

**LARGE OPTICAL SPACE-BASED TELESCOPES**

**D. V. Kirichenko, V. V. Kleymyonov, E. V. Novikova**

*A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia*  
*E-mail: elena.novikova.51@mail.ru*

An overview of the current state and tendencies in development and construction of high-tech astronomical optical space surveillance systems abroad is provided. Creation of large optical telescopes is reported to be the main trend related to efforts to improve the quality of images by enhancing the basic characteristics of optical telescopes depending on the telescope aperture size. The trend leads to increasing requirements to material and quality of optical elements. Comparative characteristics of optical materials used in the manufacture of mirrors for space-based telescopes are presented. Operating orbital telescopes (HST, Spitzer, Hershel, Gaia) and large optical telescopes under construction (SPICA, JWST, AT-LAST) with the composite and flexible mirrors controlled by active systems are considered.

**Keywords:** optical space telescopes, aperture diameter, flexible mirrors, composite segmented mirrors, active optics, optical materials, silicon carbide mirrors

**Data on authors**

- Dmitry V. Kirichenko** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Military Research Institute; Head of the Department
- Victor V. Kleymyonov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Military Research Institute; Principle Scientist; E-mail: klevik2014@yandex.ru
- Elena V. Novikova** — A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Scientist; E-mail: elena.novikova.51@mail.ru

**For citation:** Kirichenko D. V., Kleymyonov V. V., Novikova E. V. Large optical space-based telescopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 7. P. 589—602 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602