

## ДЕЙСТВУЮЩИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

В. В. КЛЕЙМЁНОВ, Е. В. НОВИКОВА

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: klevik2014@yandex.ru*

Значительные научно-технические достижения последнего времени в исследовании удаленных районов Вселенной, получении изображений космических и наземных объектов с высоким разрешением стали возможны благодаря использованию новых технологий разработки крупногабаритных оптических телескопов. Увеличение диаметра главного зеркала телескопа приводит к увеличению массы и повышению возможности деформирования поверхности зеркала и элементов конструкции телескопа. Преодолеть эту проблему позволяет использование сегментных или гибких зеркал, форма которых сохраняется благодаря активной оптике. Однако атмосферная турбулентность ухудшает качество изображений космических объектов, получаемых наземными телескопами. Для компенсации влияния атмосферы в большинстве оптических телескопов применяются методы адаптивной оптики. Представлен обзор современного состояния телескопостроения. Рассмотрены большие оптические телескопы наземного базирования с составными и гибкими зеркалами, диаметр апертуры которых превышает шесть метров, управляемыми адаптивными системами. Достигнутые при создании и модернизации крупногабаритных наземных оптических телескопов высокие разрешающая и проникающая способности позволяют ставить и решать важные научно-прикладные задачи в исследовании космических объектов естественного и искусственного происхождения. Одной из таких задач, ставшей особо актуальной в последние годы, является обнаружение малоразмерных фрагментов космического мусора, находящихся вблизи космических аппаратов и орбитальных космических станций.

***Ключевые слова:** оптические телескопы, диаметр апертуры (объектива), гибкие (деформируемые) зеркала, составные сегментные зеркала, активная оптика, адаптивные оптические системы*

**Введение.** Значительные научно-технические достижения последнего времени в изучении планет, звезд и галактик, исследовании удаленных районов Вселенной, получении изображений космических объектов с высоким разрешением стали возможны благодаря развитию новых технологий при разработке крупногабаритных оптических телескопов. Качество изображения, получаемого оптическим телескопом, зависит от ряда факторов, таких как технологические особенности изготовления зеркал больших размеров, наличие турбулентной атмосферы и место установки системы.

В настоящее время в ряде стран Европы (Европейское космическое агентство), США, Японии, Канаде ведутся активные работы по созданию новых и модернизации существующих оптических телескопов с главным зеркалом диаметром шесть, восемь и более метров.

Это обусловлено тем, что основные характеристики оптических телескопов — собирающая способность, проникающая сила и разрешающая способность — наряду с другими факторами зависят от размера апертуры телескопа.

Со времен первой подзорной трубы с диаметром апертуры 2 см, которую Галилей направил в небо в 1609 г., размер и сложность телескопов значительно выросли. Анализ их эволюции за четыре столетия показал, что диаметр апертуры самых больших телескопов удваивается каждые сорок лет, а за последнюю четверть века площадь зеркал астрономических оптических телескопов увеличилась почти в десять раз [1, 2]. Однако с увеличением диаметра главного зеркала телескопа увеличивается и его масса, что усложняет решение задачи предохранения поверхности зеркала и элементов конструкции телескопа от деформации.

Поскольку технологические возможности изготовления монолитных оптических зеркал ограничены, то увеличение диаметра свыше 6—8 м возможно за счет создания составных (сегментных) зеркал. Значительное улучшение результатов работы сегментного зеркала может быть достигнуто введением трех степеней свободы сегмента: сдвиг и наклоны в двух перпендикулярных плоскостях. Однако такие зеркала требуют в три раза больше приводов, чем зеркала только со сдвигом. Сегменты могут быть или сферическими, или асимметричными (если они часть большого параболического отражателя). Гексагональные имеют преимущество: все сегменты одной формы. Число различных типов формы несферических сегментов растет с увеличением размера всего зеркала, как и количество краевых датчиков, необходимых для определения аберраций, и приводов, используемых для управления сдвигом и наклонами сегментов.

Хотя благодаря активной оптике главное зеркало телескопа всегда сохраняет идеальную форму, турбулентность земной атмосферы искажает изображения космических объектов. Влияние атмосферных искажений можно исключить, если вести наблюдения из космоса [3], но высокая стоимость эксплуатации по сравнению с наземными инструментами ограничивает и размер, и область применения телескопов космического базирования, поэтому для компенсации влияния атмосферы были разработаны методы адаптивной оптики [4—10].

Для того чтобы адаптивная коррекция была возможна, требуется достаточно яркая опорная звезда вблизи исследуемого объекта в пределах угла изопланатизма атмосферы. Проанализировав изображение этой звезды, можно измерить деформации волнового фронта, вносимые данным участком атмосферы, и скорректировать их деформацией зеркала. Так как найти подходящую естественную звезду поблизости от объекта (в пределах угла изопланатизма) почти нереально, астрономы создают в поле зрения телескопа опорную искусственную звезду — светящуюся точку в верхних слоях атмосферы — с помощью луча мощного (несколько десятков ватт) лазера. Благодаря такому подходу методы адаптивной оптики можно применять почти в любом участке неба. Сегодня используются два вида лазерных опорных звезд: рэлеевские (на основе рассеяния излучения лазера от молекул воздуха на высоте 10 км) и натриевые (при рассеянии излучения возбужденными атомами в „натриевом слое“ на высоте 90 км).

Первостепенную роль в создании адаптивных оптических систем (АОС) сыграло учрежденное в США в 1958 г. Управление перспективными оборонными исследовательскими проектами DARPA, отвечающее за разработку технологий для новых поколений оружия. Для наблюдения за советскими орбитальными аппаратами требовались нечувствительные к атмосферным искажениям телескопы с максимально высоким (близким к дифракционному) разрешением. В 1975 году была утверждена закрытая программа разработки адаптивной оптики в интересах Пентагона. В соответствии с ней были созданы АОС на основе совершенных датчиков волнового фронта и деформируемых зеркал с сотнями приводов. Эту аппаратуру установили на 1,6-метровом телескопе, расположенном на вершине горы Халеакала на гавай-

ском острове Мауи. В июне 1982 г. с его помощью впервые удалось получить достаточно качественные фотографии искусственного спутника Земли.

В определенном смысле АОС уравнили возможности наземных и космических телескопов. Благодаря их использованию крупнейшие наземные телескопы с гигантскими зеркалами обеспечивают лучшее разрешение, чем космический телескоп Хаббл (диаметр зеркала — 2,4 м).

За последние пятьдесят лет в мире построено 14 наземных очень больших телескопов с апертурой 6 метров и более.

**Очень большие наземные оптические телескопы.** Первым 6-метровый рубеж преодолел разработанный в СССР *Большой Телескоп Альт-Азимутальный* (БТА) [11, 12]. Зеркальный телескоп-рефлектор установлен в Специальной астрофизической обсерватории (САО) на высоте 2070 м в Карачаево-Черкесии (рис. 1).

а)



б)

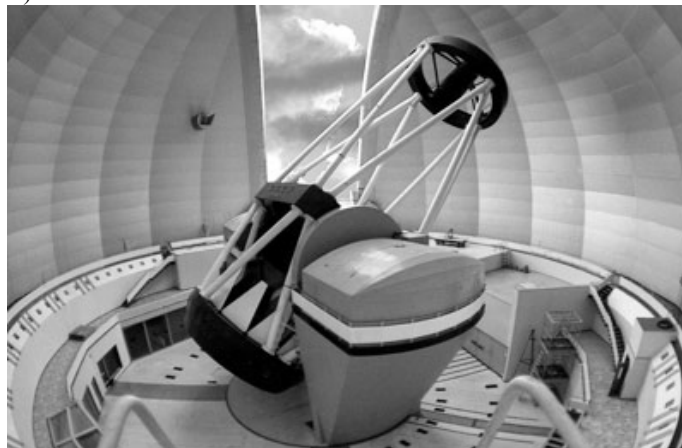


Рис. 1

Главное зеркало диаметром 6,05 м и весом более 40 тонн до 1998 г. делало БТА самым большим в мире оптическим телескопом с монолитным зеркалом, и по настоящее время телескоп БТА остается самым большим телескопом в России. Зеркало имеет форму парабоида вращения с фокусным расстоянием 24 м и собирающей площадью 25,1 м<sup>2</sup>, отражающее покрытие выполнено из алюминия толщиной 100 нм. Телескоп установлен на альт-азимутальной монтировке. Принятый впервые в мире альт-азимутальный принцип движения его оптической оси открыл путь для создания крупнейших наземных оптических телескопов.

Первые изображения с помощью БТА были получены в 1974 г. сначала на неалюминированном зеркале, а затем на алюминированном [11, 12]. Второе зеркало лучшего качества, благодаря выполнению нескольких процедур нанесения алюминия, используется на БТА уже 40 лет.

Для снижения влияния температурных эффектов на качество изображения башня телескопа оборудована системой вентиляции подкупольного пространства.

Значительный вклад в создание БТА внесли главный конструктор Б. К. Иоаннисиани, главный инженер ЛОМО В. А. Зверев и возглавляемые ими коллективы. В частности, под руководством Виктора Алексеевича Зверева были разработаны уникальный комплекс аппаратуры, методы контроля и аттестации формы поверхности зеркала, впервые выполнено математическое моделирование реальной формы поверхности зеркала и разработана система автоматизированной обработки поверхности.

В конце 2017 г. были проведены работы по обновлению главного зеркала. Отполированное зеркало отправлено в САО в феврале 2018 г.

ММТ (Multiple Mirror Telescope) [13, 14] расположен в штате Аризона, США, в горах Санта-Рита. Свое название „многозеркальный“ телескоп получил благодаря первоначальной конструкции (функционировавшей с 1979 до 1998 г.): свет собирался шестью зеркалами, каждое диаметром 1,8 м, обеспечивая собирающую площадь, эквивалентную площади 4,5-метрового телескопа. В настоящее время телескоп имеет главное зеркало диаметром 6,5 м специальной облегченной сотовой конструкции. Модернизация ММТ была завершена в мае 2000 г. В 2002 г. к телескопу было добавлено деформируемое вторичное зеркало. Конструкторские новации ММТ включают необычную оптическую схему, предложенную американским астрономом Э. Мейнелом, синхронно вращающийся кожух и альт-азимутальное крепление. Несколько новых технологий, в частности использование адаптивной оптики, впервые были проверены на ММТ, что содействовало развитию телескопостроения.

*Телескопы Кека* (Keck Telescopes) находятся в обсерватории, расположенной на острове Гавайского архипелага на вершине горы Мауна-Кеа (4145 м над уровнем моря) в США [15—22]. Два зеркальных телескопа расположены на расстоянии 85 м друг от друга, диаметр первичных зеркал 10 м. Первый телескоп был закончен в 1993 г., второй — в 1996 г. Каждое первичное зеркало составлено из 36 шестиугольных сегментов. Каждый сегмент толщиной 8 см весит 0,5 тонны. Все сегменты изготовлены из стеклокерамики церодур (Zerodur), имеющей очень низкий коэффициент теплового расширения. Так как этот материал не отражает свет, сегменты покрыты тонким слоем алюминия. Полный вес каждого телескопа более 300 тонн. Эффективная собирающая площадь телескопов Кека 75,76 м<sup>2</sup>.

Сохранять положение каждого сегмента позволяет система активной оптики, включающая сверхжесткие опорные механизмы поддержки и наведения, а также три высокоточных привода. Во время наблюдения система датчиков и приводов, управляемая компьютером, регулирует положение каждого сегмента относительно соседних с погрешностью до 4 нм. Эта система дважды в секунду компенсирует структурные изменения, влияющие на форму зеркала, а также воздействия окружающей среды и гравитации при движении телескопа, которые могут влиять на форму зеркала.

В 1999 г. телескопы Кека были оборудованы АОС с лазерной опорной звездой для компенсации искажений изображений, обусловленных атмосферной турбулентностью. Благодаря изменению формы зеркала с частотой 2 кГц изображение получается в 10 раз четче и имеет разрешение 0,04". Телескопы обсерватории Кека остаются самыми большими управляемыми телескопами в мире, работающими в видимой и ИК-области спектра.

*Телескоп Хобби-Эберли* (Hobby-Eberly Telescope, HET) расположен в Техасе, США, в обсерватории Мак Дональда на высоте 2026 м, введен в действие в декабре 1996 г. [23—27].

Главное зеркало диаметром 9,2 м состоит из 91 гексагонального сегмента, каждый размером 1 м, толщиной 5 см. Сегменты изготовлены из стеклокерамики церодур. Вес зеркала 13 тонн. Компьютер управляет электроприводами, прикрепленными к задней стороне каждого сегмента. Здания, в которых находятся лазерная система настройки сегментов и телескоп,

территориально разнесены. Объединенные сегменты образуют собирающую свет поверхность размером  $11 \times 10$  м.

Зеркало НЕТ закреплено под углом  $55^\circ$  относительно горизонта и может вращаться вокруг своего основания. Для компенсации в верхней части телескопа над главным зеркалом установлена система слежения, которая, двигаясь, собирает свет только от части поверхности зеркала. Поэтому НЕТ известен как 9,2-метровый телескоп, так как именно такая часть зеркала эффективно используется при наблюдении за космическими объектами. В состав телескопической системы входят еще два зеркала-корректора: вторичное и третичное, оба диаметром 1 м.

Для анализа принимаемого излучения используются три спектрографа — высокого, среднего и низкого спектрального разрешения. Спектрограф низкого разрешения находится в основном фокусе, а среднего и высокого — в цоколе здания, и свет к ним идет через волоконно-оптический кабель.

*Очень Большой Телескоп* (Very Large Telescope, VLT) установленный в Паранальской обсерватории на горе Серро-Параналь, Чили (высота 2635 м), построен в 1998—2000 гг., он находится под управлением Европейской Южной Обсерватории (ESO) [28—32].

VLT состоит из четырех отдельных 8,2-метровых оптических телескопов (UT1—UT4), построенных по схеме Ричи—Кретьена. Телескопы UT расположены в компактных терморегулируемых зданиях, которые вращаются синхронно с телескопами. Такая конструкция минимизирует любые неблагоприятные воздействия, например влияние завихрений воздуха в трубе телескопа, которые могут образоваться из-за перепадов температуры. Каждый из телескопов может передвигаться по горизонтали и вертикали, что позволило увеличить разрешающую способность в 25 раз. В 2004—2007 гг. построены еще четыре 1,8-метровых вспомогательных телескопа (AT), разработанные для повышения четкости изображения, получаемого с помощью четырех основных зеркал. Они могут перемещаться вокруг основных телескопов и используются для интерферометрических наблюдений. Верхняя часть каждого состоит из подвижных сегментов (которые открываются и закрываются), предназначенных для защиты чувствительных 1,8-метровых телескопов от неблагоприятных воздействий пустыни.

В январе 2012 г. UT1—UT4 были объединены в одну систему и образовали гигантский интерферометр VLTI. В VLTI световые пучки объединяются посредством сложной системы зеркал, расположенных в подземных туннелях, при этом равенство оптических путей поддерживается с погрешностью 0,001 мм на расстоянии более 100 м. При такой оптической точности телескоп VLTI способен строить изображения с угловым разрешением в несколько угловых миллисекунд. В результате VLTI стал эквивалентен по угловому разрешению телескопу со сплошным зеркалом в 130 м. Техническое оснащение комплекса включает также широкоугольные приемники изображения, камеры и спектрографы с адаптивной оптической коррекцией, спектрографы высокого разрешения и многоспектральные спектрографы, перекрывающие широкий спектральный диапазон от УФ (300 нм) до ИК (24 мкм).

В апреле 2016 г. были проведены первые наблюдения с использованием четырех лазерных искусственных звезд, создаваемых четырьмя 22-ваттными лазерами 4LGSF\* (Япония), что позволило повысить качество изображения в более широком поле зрения телескопа. Это первый в ESO опыт использования сразу нескольких лазерных искусственных звезд. На рис. 2 приведено устройство формирования четырех лазерных опорных звезд телескопа VLT [31]: 1 — телескоп UT4; 2 — корпуса комбинационных лазеров, опорный лазер и лазер с накачкой (1178 нм ИК); 3 — лазерный луч диаметром 30 см (589 нм); 4 — кожух телескопа (в разрезе); 5 — пусковой телескоп лазера и умножитель частоты.

---

\* Лазеры 4LGSF также используются при создании опорных лазерных звезд для компенсации влияния атмосферы в обсерватории Кека, телескопах Субару и Джемми.

В настоящее время обсерватория Параналь обладает самыми совершенными и многочисленными действующими системами адаптивной оптики по сравнению с любой другой обсерваторией мира.

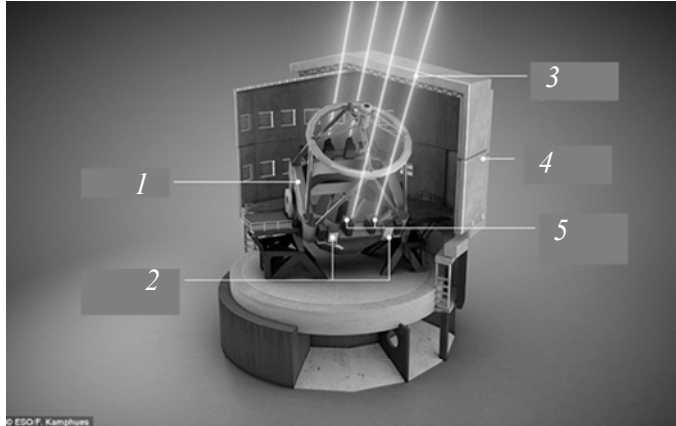


Рис. 2

*Субару* (Subaru Telescope) — оптический телескоп-рефлектор со сплошным главным зеркалом диаметром 8,2 м, построенный по схеме Ричи-Кретьена, работающий в видимой и ИК-областях спектра, — принадлежит японской Национальной астрономической обсерватории [33—37]. Он расположен на горе Мауна-Кеа, Гавайи, на высоте 4139 м. Собирающая площадь телескопа 53 м<sup>2</sup>. Телескоп Субару введен в эксплуатацию в 1999 г. В 2001—2006 гг. проведена модернизация телескопа посредством замены первоначальной 36-элементной АОС усовершенствованной 188-элементной системой с коррекцией атмосферных искажений по лазерной опорной звезде.

Два главных компонента АОС — датчик волнового фронта и деформируемое зеркало. Датчик волнового фронта имеет решетку из 188 линз, которые делят свет от опорной звезды на 188 частей и посылают его на 188 лавинных фотодиодов. Измеренные ошибки волнового фронта корректируются с частотой 1 кГц при помощи биморфного пьезоэлектрического деформируемого зеркала диаметром 130 мм и толщиной 2 мм. На телескопе в четырех фокальных точках установлены несколько камер и спектрографов для наблюдения в видимом и ИК-диапазонах длин волн. Использование уникального японского твердотельного лазера и оптоволоконных технологий обеспечивает высокую стабильность излучения по мощности и частоте [36].

Фотонные кристаллические оптические световоды используются для направления излучения от лазера к расширяющей апертуре диаметром 50 см с минимальной потерей энергии. На рис. 3 представлена функциональная схема телескопа Субару [33]: 1 — естественная опорная звезда; 2 — цель; 3 — лазерная опорная звезда; 4 — лазерный луч; 5 — натриевый слой; 6 — атмосферная турбулентность; 7 — волоконный световод; 8 — лазер; 9 — искаженный волновой фронт; 10 — скорректированный волновой фронт; 11 — деформируемое зеркало; 12 — видимое излучение; 13 — ИК-камера/спектрограф; 14 — блок управления; 15 — датчик волнового фронта.

Использование естественной или формирование искусственной лазерной звезды в качестве опорного источника в направлении на геостационарный космический аппарат (в пределах угла изопланатизма атмосферы) позволяет посредством АОС обеспечить высокие разрешающую и проникающую способности телескопа и тем самым определить наличие вблизи КА космического мусора и степень его опасности.

При проектировании и строительстве телескопа Субару был использован ряд других современных технологий. Например, 261 привод, управляемый компьютером, корректирует деформации главного зеркала при изменении ориентации телескопа. Корпус телескопа также

приспособлен для минимизации влияния воздушной турбулентности с целью повышения качества изображений космических объектов.

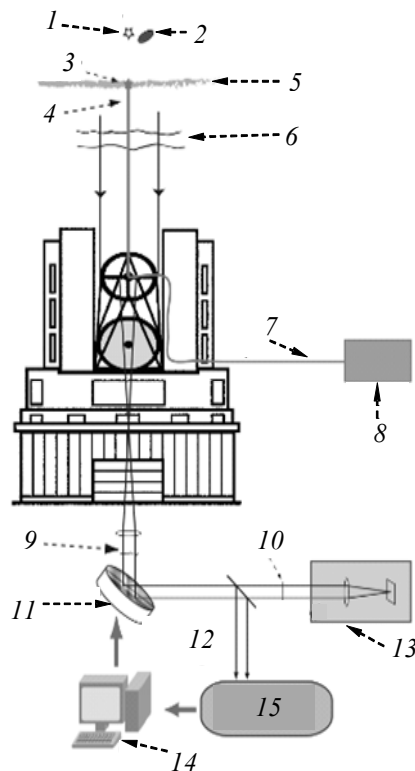


Рис. 3

*Телескопы Джемини Северный и Джемини Южный (Gemini North and Gemini South Telescopes).* Астрономическая обсерватория Джемини включает два оптических ИК-телескопа, их главные зеркала диаметром 8,1 м — монолитны [38—40].

Джемини Северный построен в 1999 г. на горе Мауна-Кеа на высоте 4200 м на Гавайских островах; Джемини Южный — в 2000 г. на горе Серо Пачина на высоте 2700 м над уровнем моря в чилийских Андах. Оба телескопа — это результат сотрудничества семи стран: США, Великобритании, Канады, Чили, Австралии, Бразилии и Аргентины. Вместе телескопы Джемини обеспечивают полноценное наблюдение северного и южного полушарий небосвода и представляют один из крупнейших наиболее совершенных в настоящее время оптических инфракрасных телескопов.

Адаптивная оптическая система Джемини использует метод многосопряженной адаптивной оптики (Multi-Conjugate AO, MCAO). Суть его — в коррекции атмосферных искажений по излучению от четырех искусственных лазерных звезд\*\*, формируемых в четырех угловых секторах поля зрения телескопа, и от одной звезды — в его середине.

*Магеллановы Телескопы (Magellan Telescopes)* — два оптических телескопа диаметром 6,5 м, работающие в видимой и ближней ИК-областях спектра [42—44]. Они расположены в обсерватории Лас-Кампанес (Las Campanas Observatory) в Чили, находятся в ведении сообщества университетов США. Первый (Бааде) начал свою работу в сентябре 2000 г., второй (Клей) — в сентябре 2002 г.

Главные зеркала — параболоиды с относительным отверстием  $f/1,25$  — радикально отличаются от зеркал из твердого стекла. Каждое весит 9,5 тонн, изготовлено из боросиликатного стекла и имеет облегченную ячеистую (сотовидную) структуру. Толщина алюминиевого

\*\* Предполагается, что следующее поколение систем адаптивной оптики будет использовать семь лазерных опорных звезд [41].

покрытия поверхности каждого зеркала 0,1 мкм. Ячеистая структура выполняет две важные функции: система терморегуляции ячейки препятствует ее деформациям вследствие термического расширения и сжатия; системы опор в ячейках поддерживают правильную форму зеркал во избежание смещений и растрескивания. Поддерживается отклонение от формы зеркальной поверхности в пределах 0,05 мкм. Телескопы плавают на пленке масла с противозадирными присадками в 9-метровом сосуде. Для предотвращения проскальзывания приводные цилиндры и поверхности двигателя спрессованы при нагрузке 4,5 тонны.

В 2013 г. телескоп Клей был оборудован адаптивным вторичным зеркалом диаметром 850 мм, которое позволило ему получать изображения в видимом диапазоне с разрешением 0,02".

*Большой Зенитный телескоп* (Large Zenith Telescope, LZT) — крупнейший в мире жидкозеркальный телескоп [45—47] — построен в 2003 г. в Канаде, недалеко от Ванкувера на высоте 395 м над уровнем моря. Его главное зеркало имеет форму параболеоида диаметром 6 м с фокусным расстоянием 10 м.

Для изготовления зеркала, поверхность которого отличается от идеального параболеоида меньше чем на четверть длины волны (по критерию Рэлея), была использована следующая особенность. Если чашу, наполненную жидкостью, привести во вращение, жидкая поверхность примет параболическую форму (в качестве жидкости использовалась ферромагнитная жидкость на основе ртути). Ключевой частью конструкции телескопа является воздушная подушка, поддерживающая его трехтонное главное зеркало, которое с помощью мотора равномерно вращается со скоростью 6 об/мин. Фокусировка телескопа производится изменением положения зеркала с помощью шести опор, на которых оно закреплено.

АОС включает в себя набор электромагнитов, расположенных под зеркалом и предназначенных для прецизионной корректировки его формы с целью устранения атмосферных искажений.

Жидкое зеркало имеет ряд преимуществ перед твердотельным. Оно на порядки дешевле сложных многосегментных зеркал, используемых в крупных телескопах, поскольку не требует сложной технической обработки для придания правильной оптической формы. Однако любое отклонение поверхности зеркала от горизонтали под воздействием земной гравитации исказит его форму так, что астрономические наблюдения станут невозможными. Поэтому оптическая ось такого инструмента должна быть направлена исключительно в зенит, что значительно ограничивает возможности наблюдения.

*Большой бинокулярный телескоп* (Large Binocular Telescope, LBT) — один из наиболее технологически передовых и обладающих наивысшим разрешением оптических телескопов в мире [48—53]. Он был открыт в штате Аризона, США, на горе Грэхем на высоте 3,3 км в октябре 2005 г., является частью международной обсерватории Маунт-Грэм. Телескоп установлен на вращающемся основании и сверху закрывается куполом. LBT является уникальным прибором, он характеризуется двумя смонтированными на общем креплении оптическими системами с главными зеркалами по 8,4 м. Межосевое расстояние составляет 14,4 м. Светосила LBT эквивалентна светосиле телескопа с одним зеркалом диаметром 11,8 м. LBT собирает излучение с площади 110 м<sup>2</sup>, в результате чего по разрешающей способности он эквивалентен телескопу с одним зеркалом диаметром 22,65 м.

Летом 2010 г. была введена в действие АОС FLAO (First Light AO) с деформируемым вторичным зеркалом. На обратной стороне адаптивного параболического зеркала диаметром 911 мм и толщиной 1,6 мм размещены 672 привода, управляемые пирамидальным датчиком волнового фронта высокого порядка. Коррекция формы зеркала выполнялась с частотой 1 кГц, что позволило компенсировать влияние атмосферы. В результате были достигнуты уникальные показатели: получены изображения в Н-диапазоне (1,6 мкм) с коэффициентом Штреля  $St > 0,8$ . Такой же телескоп без АО давал изображение с  $St = 0,1$ .



Используя сразу оба главных зеркала, телескоп LBT способен, во-первых, посредством метода интерферометрии получать изображения космического объекта с очень высоким разрешением, а во-вторых, делать снимки объекта в разных спектральных фильтрах, что значительно сокращает время наблюдения, требуемое для получения необходимой информации.

*Большой южно-африканский телескоп* (Southern African Large Telescope, SALT) — крупнейший оптический телескоп-рефлектор Южного полушария, расположенный в полупустыне Кару в ЮАР на высоте 1783 м [54, 55]. Первые снимки с помощью телескопа получены в сентябре 2005 г.

Главное зеркало состоит из 91 гексагонального зеркального сегмента, каждый диаметром 1 м. Сегменты образуют сферическую, а не параболическую поверхность главного зеркала размером 11×9,8 м. Для компенсации сферичности зеркала телескоп снабжен четырехзеркальным корректором сферических аберраций (SAC), который обеспечивает плоскую фокальную плоскость с полем зрения в 8' в главном фокусе. Каждый зеркальный сегмент изготовлен из ситаллового стекла с низким коэффициентом расширения и может быть откорректирован по сдвигу и наклонам в двух перпендикулярных плоскостях.

Датчик настройки кривизны CCAS (Curvature Alignment Sensor), помещенный в вершине башни, смежной со зданием телескопа, направляет лазерное излучение вниз на все зеркальные сегменты и регистрирует отраженные сигналы от каждого сегмента, что позволяет оператору телескопа корректировать форму зеркала. Телескоп дает возможность получать изображения, проводить спектроскопический и поляриметрический анализ излучения от астрономических объектов, находящихся вне поля видимости телескопов северного полушария. От НЕТ его отличают реконструированный отражающий корректор сферических аберраций (SAC) и активная система настройки главного зеркала, использующая емкостной краевой датчик (кромкоискатель) для измерения движения сегментов главного зеркала.

*Большой Канарский телескоп* (Gran Telescopio CANARIAS, GTC) — оптический телескоп-рефлектор системы Ричи-Кретьена расположен на острове Ла-Пальма Канарского архипелага (Испания) на высоте 2400 м над уровнем моря и работает в ИК и видимом диапазонах [56—58]. Телескоп начал свою работу в июле 2007 г. Диаметр его главного зеркала 10,4 м, фокусное расстояние 169,9 м, собирающая площадь 73 м<sup>2</sup>. Зеркало изготовлено из церодура, оно состоит из 36 гексагональных сегментов, настраиваемых системой активной оптики. Телескоп снабжен также АОС для компенсации искажений изображения, вносимых атмосферой. Блок формирования дифракционно-ограниченных изображений CanariCam позволяет использовать также поляриметрию и коронографию в дополнение к стандартным способам получения изображения и спектроскопии, что делает его универсальным и мощным инструментом.

*Большой многоцелевой спектроскоп для наблюдения обширных районов неба* (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST) — крупнейший на данный момент спектроскоп, находящийся в Китае, недалеко от Пекина — введен в действие в 2009 г. [59—61].

Это меридианный отражательный телескоп Шмидта, состоящий из двух зеркал. Его фокусное расстояние 20 м, относительное отверстие  $f/5$ . Каждое зеркало состоит из набора 1,1-метровых гексагональных деформируемых сегментов. Первое зеркало — МА (24 сегмента, собранные в прямоугольник размером 5,72×4,4 м) — представляет собой корректирующую пластину Шмидта под куполом на наземном уровне. Почти плоское зеркало МА отражает свет по большому наклонному туннелю на второе большое сферическое фокусирующее зеркало МВ (37 сегментов, сложенных в прямоугольник размером 6,67×6,09 м). Это зеркало направляет свет на фокальную плоскость 1,75 м в диаметре, соответствующую полю обзора в 5°. В фокальной плоскости расположено 4000 волоконно-

позиционирующих блоков, к каждому из которых подведено оптическое волокно, передающее свет к одному из шестнадцати 250-канальных спектрографов. Сегменты обоих зеркал приспособлены для коррекции искажений, вносимых атмосферой. Коррекция осуществляется на основе сигналов управления, формируемых по излучению от опорной лазерной звезды. Использование адаптивной оптики в реальном времени для управления отражательным корректором делает его уникальным астрономическим инструментом. Имеющаяся большая фокальная плоскость может вмещать тысячи световодов, с помощью которых собранный свет от удаленных и тусклых астрономических объектов до 20,5 звездной величины попадает на спектрографы,

В отличие от большинства телескопов, которые могут перемещаться для нацеливания на любую точку на небе, положение LAMOST фиксировано и настроено вдоль меридиана (север—юг). С помощью телескопа, тем не менее, возможно наблюдать большую часть неба северного полушария, но зафиксировать объекты можно, лишь когда они оказываются вблизи меридиана. Здание содержит зеркало, которое может быть нацелено для захвата объектов в пределах примерно  $30^\circ$  около меридиана.

**Заключение.** Из четырнадцати рассмотренных функционирующих телескопов с диаметром главного зеркала от 6 до 10 метров большинство оснащено системами активной и/или адаптивной оптики с использованием лазерных опорных звезд. Причем адаптивными необязательно являются главные зеркала, но и вторичные, и третичные. На некоторых телескопах (например, VLT) используется несколько адаптивных систем. Зеркала могут быть монолитными, гибкими деформируемыми, составными (из круглых зеркал небольшого диаметра) и сегментными из гексагональных элементов (гибких или монолитных). Достигнутые при создании и модернизации крупногабаритных наземных оптических телескопов высокие разрешающая и проникающая способности позволяют ставить и решать новые и важные научно-прикладные задачи в исследовании космических объектов естественного и искусственного происхождения. Одной из таких задач, ставшей особо актуальной в последние годы, является обнаружение малоразмерных фрагментов космического мусора, находящихся вблизи космических аппаратов и орбитальных космических станций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теребиж В. Ю.* Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 80 с. [Электронный ресурс]: <[http://terebizh.ru/V.YU.T/publications%5C2005\\_02e.pdf](http://terebizh.ru/V.YU.T/publications%5C2005_02e.pdf)>.
2. Telescope Optics III: Modern Telescopes [Электронный ресурс]: <<http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/astr511/lectures/optics3/optics3.html>>.
3. *Кириенко Д. В., Клейменов В. В., Новикова Е. В.* Крупногабаритные оптические космические телескопы // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 589—602. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602
4. *Hart M., Jefferies S., Murphy N.* Daylight operation of a sodium laser guide star // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. P. 99095N. DOI: 10.1117/12.2235080
5. *D'Orgeville C., Fetzer G. J.* Four generations of sodium guide star lasers for adaptive optics in astronomy and space situational awareness // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. P. 99090R (18). DOI: 10.1117/12.2234298
6. *Gavel D. T.* An overview of guidestar laser technologies // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84470E (7). DOI: 10.1117/12.927023
7. *Wood G. E., Roggemann M. C., Welsh B. M.* Estimation of satellite orientation from space surveillance imagery measured with an adaptive optics telescope // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3125. DOI: 10.1117/12.279025

8. *Zihao Xu, Chengliang Yang, Peiguang Zhang, Xingyun Zhang, Zhaoliang Cao, Quanquan Mu, Qiang Sun, Li Xuan.* Visible light high-resolution imaging system for large aperture telescope by liquid crystal adaptive optics with phase diversity technique // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 10034. [Электронный ресурс]: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5577037/>>.
9. *Marlow W. A., Carlton A. K., Hyosang Yoon, Clark J. R., Haughwout Ch. A., Cahoy K. L., Males J. R., Close L. M., Morzinski K. M.* Laser-Guide-Star Satellite for Ground-Based Adaptive Optics Imaging of Geosynchronous Satellites // *Journal of Spacecraft & Rockets.* 2017. Vol. 54, N 3. P. 621—639.
10. *Laser Guidestar. Adaptive Optics and Laser Guide Star.* 2012 [Электронный ресурс]:<[https://budker.uni-mainz.de/?page\\_id=38](https://budker.uni-mainz.de/?page_id=38)>.
11. *Иоаннисиани Б. К.* Разработка телескопа с диаметром зеркала 6 метров // *Оптико-механическая промышленность.* 1970. № 4. С. 37—48.
12. *Иоаннисиани Б. К.* Телескоп с диаметром зеркала 6 метров. I. Исходные данные // *Астрофизические исследования (Изв. CAO АН СССР).* 1971. Т. 3. С. 3—19.
13. *Williams G. G., Ortiz R., Goble W., Gibson J. D.* The 6.5-m MMT Telescope: status and plans for the future // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9906. P. 99060V(10).
14. *Ulich B. L.* Performance of the Multiple Mirror Telescope (MMT). Pointing and Tracking of the MMT // *Proc. SPIE.* 1982. Vol. 0332. Nov. Advanced Technology Optical Telescopes I.
15. *Chin J. C. Y., Wizinowich P., Campbell R., Chock L., Cooper A., Lyke E., Mastromarino J., Martin O., Medeiros D., Morrison D., Neyman Ch., Panteleev S., Stalcup Th., Tucker P., Wetherell E., van Dam M.* Keck I laser guide star adaptive optics system // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8447. P. 84474F (12). DOI: 10.1117/12.925807
16. *Meeks R. L., Doyle S., Higginson J., Hudek J. S., Irace W., McBride D., Pollard M., Kuochou Tai, Von Boeckmann T., Wold L., Wold T. W. M.* Keck Observatory primary mirror segment repair project: overview and status // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9906. P. 990603 (18). DOI: 10.1117/12.2233693
17. *Wizinowich P. L., Le Mignant D., Bouchez A. H., Campbell R. D., Chin J. C. Y., Contos A. R., van Dam M. A., Hartman S. K., Johansson E. M., Lafon R. E.* The W. M. Keck Observatory Laser Guide Star Adaptive Optics System: Overview // *Astronomical Society of the Pacific.* 2006. Vol. 118, N 840. P. 297—309 [Электронный ресурс]: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/499290>>.
18. *Chin J. C. Y., Wizinowich P., Wetherell E., Lilley S., Cetre S., Ragland S., Medeiros D., Tsubota K., Doppmann G., Otarola A., Wei K.* Keck II laser guide star AO system and performance with the TOPTICA/MPBC laser // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9909. P. 99090S. DOI: 10.1117/12.2233138
19. *Cranston P. G., McBride D., Sarawit A. T., Kan F. W.* Keck primary mirror figure changes from mirror support repairs // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9906. P. 99061G (15). DOI: 10.1117/12.2233937
20. *Chin J. C. Y., Wizinowich P., Wetherell E., Cetre S., Campbell R. R., Lilley S., Lyke J., Medeiros D., Rampy R., Stalcup Th., Tsubota K., Tucker P., Wei K.* Laser guide star facility developments at W. M. Keck Observatory // *Proc. SPIE.* 2014. Vol. 9148. P. 914808 (16). DOI: 10.1117/12.2057449
21. *Wizinowich P., Smith R., Biasi R., Cetre S., Dekany R., Femenia-Castella B., Fucik J., Hale D., Neyman Ch., Pescoller D., Ragland S., Stomski P., Andrighttoni M., Bartos R., Bui Kh., Cooper A., Cromer J., van Dam M., Hess M., James E., Lyke J., Rodriguez H., Stalcup Th.* A near-infrared tip-tilt sensor for the Keck I laser guide star adaptive optics system // *Proc. SPIE.* 2014. Vol. 9148. P. 91482B (12). DOI: 10.1117/12.2055279
22. *Jolissaint L., Neyman Ch., Christou J., Wizinowich P.* Adaptive optics point spread function reconstruction project at W. M. Keck Observatory: first results with faint natural guide stars // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8447. P. 844728. DOI: 10.1117/12.926607
23. *Hill G. J., Drory N., Good J. M., Lee H., Vattiat B. L., Kriel H., Ramsey J., Bryant R., Elliot L., Fowler J., Häuser M., Landiau M., Leck R., Odewahn St., Perry D., Savage R., Schroeder Mrozinski E., Shetrone M., DePoy D. L., Prochaska T., Marshall J. L., Damm G., Gebhardt K., MacQueen P. J., Martin J., Armandroff T., Ramsey L. W.* Deployment of the Hobby-Eberly Telescope wide-field upgrade // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9906. P. 990606 (19).
24. *Häuser M., Richter J., Kriel H., Turbyfill A., Buetow B., Ward M.* Upgrade of the HET segment control system, utilizing state-of-the-art, decentralized and embedded system controllers // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9906. P. 990602 (11). DOI: 10.1117/12.2232410

25. Hill G. J., Drory N., Good J. M., Lee H., Vattiat B. L., Kriel H., Ramsey J., Bryant R., Elliot L., Fowler J., Häuser M., Landiau M., Leck R., Odewahn St., Perry D., Savage R., Schroeder Mrozinski E., Shetrone M., De Poy D. L., Prochaska T., Marshall J. L., Damm G., Gebhardt K., MacQueen P. J., Martin J., Armandroff T., Ramsey L. W. Deployment of the Hobby-Eberly Telescope wide-field upgrade // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9145. P. 914506 (19). DOI: 10.1117/12.2231063
26. Chang Jin Oh, Frater E. Lowman A. E., Peng Su, Chunyu Zhao, Ping Zhou, Burge J. H. Development of a wide field spherical aberration corrector for the Hobby-Eberly Telescope: design, fabrication and alignment // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9145. P. 914509 (12). DOI: 10.1117/12.2056879
27. Hill G. J., Booth J. A., Cornell M. E., Good J. M., Gebhardt K., Kriel H. J., Lee H., Leck R., Moreira W., MacQueen P. J., Perry D. M., Rafal M. D., Rafferty T. H., Ramiller C., Savage R. D., Taylor C. A., Vattiat B. L., Ramsey L. W., Beno J. H., Beets T. A., Esguerra J. D., Häuser M., Hayes R. J., Heisler J. T., Soukup I. M., Zierer J. J., Worthington M. S., Mollison N. T., Wardell D. R., Wedeking G. A. Current status of the Hobby-Eberly Telescope wide field upgrade // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8444. P. 84440K (14). DOI: 10.1117/12.925435
28. Briguglio R., Biasi R., Xompero M., Riccardi A., Andrighettoni M., Pescoller D., Angerer G., Gallieni D., Vernet E., Kolb J., Arsenault R., Madec P.-Y. The deformable secondary mirror of VLT: final electro-mechanical and optical acceptance test results // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9148. P. 914845 (8). DOI: 10.1117/12.2057591
29. First light for the Four Laser Guide Star Facility on ESO's Very Large Telescope. April 27, 2016 [Электронный ресурс]: <<https://phys.org/news/2016-04-laser-star-facility-eso-large.html>>.
30. Macdonald Ch. The giant lasers so powerful they can create an artificial STAR: Chilean instrument can cut through the atmosphere to give astronomers a clear view. 27 April 2016 [Электронный ресурс]: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3562451/The-giant-lasers-powerful-create-artificial-STAR-Chilean-instruments-cut-atmosphere-astronomers-clear-view.html>>.
31. Malik T. Zap! This Awesome Laser-Armed Telescope Is Fully Operational. April 28, 2016 [Электронный ресурс]: <<https://www.space.com/32724-awesome-very-large-telescope-lasers-photos.html>>.
32. Wildi F. Adaptive Optics in the VLT and ELT era basics of AO [Электронный ресурс]: <[http://www.isdc.unige.ch/~paltani/Courses/Instr\\_adaptiveoptics\\_wildi.pdf](http://www.isdc.unige.ch/~paltani/Courses/Instr_adaptiveoptics_wildi.pdf)>.
33. Subaru Telescope Improves its Eye sight by a Factor of Ten. November 20, 2006 [Электронный ресурс]: <<http://www.naoj.org/Pressrelease/2006/11/20/index.html>>.
34. Guyon O., Hayano Y., Tamura M., Kudo T., Oya S., Minowa Y., Lai O., Jovanovic N., Takato N., Kasdin J., Groff T., Hayashi M., Arimoto N., Takami H., Bradley C., Sugai H., Perrin G., Tuthill P., Mazin B. Adaptive optics at the Subaru telescope: current capabilities and development // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9148. P. 91481R (10). DOI: 10.1117/12.2057273
35. Hattori M., Shirahata M., Minowa Y., Oya S., Hayano Y., Takami H., Iye M. Recent development in real time control system of Subaru LGSAO-188 // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84472P(7). DOI: 10.1117/12.927227
36. Ellerbroek B. L. A Status Report on the Thirty Meter Telescope Adaptive Optics Program // Journal of Astrophysics and Astronomy. 2013. N 34. P. 121—139.
37. Oya S., Akiyama M., Hayano Y., Minowa Y., Iwata I., Terada H., Usuda T., Takami H., Nishimura T., Kodama T., Takato N., Tomono D., Ono Y. A preliminary simulation result of the next-generation wide-field AO at Subaru Telescope // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84473V (11). DOI: 10.1117/12.926556
38. Carrasco E. R., Edwards M. L., McGregor P. J., Winge C., Young P. J., Doolan M. C., van Harmelen J., Rigaut F. J., Neichel B., Trancho G., Artigau E., Pessev P., Colazo F., Tigner J., Mauro F., Lührs J., Rambold W. N. Results from the commissioning of the Gemini South Adaptive Optics Imager (GSAOI) at Gemini South Observatory // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84470N (18). DOI: 10.1117/12.926240
39. Neichel B., Rigaut F., Serio A., Arriagada G., Boccas M., d'Orgeville C., Fesquet V., Trujillo Ch., Rambold W. N., Galvez R. L., Gausachs G., Vucina T. B., Montes V., Urrutia C., Moreno C., Diggs S. J., Araya C., Lührs J., Trancho G., Bec M., Marchant C., Collao F., Carrasco E., Edwards M., Pessev P., Lopez A. A., Diaz H. Science readiness of the Gemini MCAO system: GeMS // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84470W. DOI: 10.1117/12.925915

40. *d'Orgeville C., Diggs S., Fesquet V., Neichel B., Rambold W., Rigaut F., Serio A., Araya C., Arriagada G., Balladares R., Bec M., Boccas M., Duran C., Ebberts A., Lopez A., Marchant C., Marin E., Montes V., Moreno C., Petit Vega P., Segura C., Trancho G., Trujillo C., Urrutia C., Veliz P., Vucina T.* Gemini South multi-conjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84471Q. DOI: 10.1117/12.925813
41. *Ghez A.* From Nautilus: “Opening a New Window into the Universe”. April 2017 [Электронный ресурс]: <<https://sciencesprings.wordpress.com/2017/05/25/from-nautilus-opening-a-new-window-into-the-universe/>>.
42. *Morzinski K. M., Close L. M., Males J. R., Kopon D., Hinz P. M., Esposito S., Riccardi A., Puglisi A., Pinna E., Briguglio R., Xompero M., Quirós-Pacheco F., Bailey V., Follette K. B., Rodigas T. J., Ya-Lin Wu, Arcidiacono C., Argomedo J., Busoni L., Hare T., Uomoto A., Weinberger A.* MagAO: Status and on-sky performance of the Magellan adaptive optics system // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9148. P. 914804. DOI: 10.1117/12.2057048
43. *Morzinski K. M., Close L. M., Males J. R., Hinz P. M., Esposito S., Riccardi A., Briguglio R., Follette K. B., Pinna E., Puglisi A., Vezilj J., Xompero M., Ya-Lin Wu.* MagAO: status and scien // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. P. 990901 (17). DOI: 10.1117/12.2233911
44. *Close L. M., Males J. R., Kopon D. A., Gasho V., Follette K. B., Hinz Ph., Morzinski K., Uomoto, Hare T., Riccardi A., Esposito S., Puglisi A., Pinna E., Busoni L., Arcidiacono C., Xompero M., Briguglio R., Quiros-Pacheco F., Argomedo J.* First closed-loop visible AO test results for the advanced adaptive secondary AO system for the Magellan Telescope: MagAO's performance and status // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8447. P. 84470X (16). DOI: 10.1117/12.926545
45. *Gamma E.* Liquid Astronomy. (Large Zenith Telescope) // Sky&Telescope. 2013. April. P. 26—30 [Электронный ресурс]: <<http://eaglegamma.com/wp-content/uploads/2013/09/LZT.pdf>>.
46. *Andersen G.* The Telescope. Its History, Technology and Future. Prinseton Univercity Press, 2007. 165 p. [Электронный ресурс]: <<https://science.howstuffworks.com/engineering/structural/10-strange-structural-engineering-marvels5.htm>>.
47. *Hickson P., Borra E., Cabanac R., Chapman S., de Lapparent V., Murooney M., Walker G.* The Large Zenith Telescope project — A 6-meter mercury-mirror telescope // Proc. of SPIE. 1998. Vol. 3352. P. 226—232.
48. *Hill J. M., Ashby D. S., Brynnel J. G., Christou J. C., Little J. K., Summers D. M., Veillet C., Wagner R. M.* The Large Binocular Telescope: binocular all the time // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9145. P. 914502 (12). DOI: 10.1117/12.2055218
49. *Ashby D. S., Biddick Ch., Hill J. M.* Active optics control development at the LBT // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9145. P. 91452S (16). DOI: 10.1117/12.2057193
50. *Hill J. M., Green R. F., Ashby D. S., Brynnel J. G., Cushing N. J., Little J. K., Slagle J. H., Wagner R. M.* The Large Binocular Telescope // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8444. P. 84441A(12). DOI: 10.1117/12.926636
51. *Esposito S., Riccardi A., Pinna E., Puglisi A., Quirós-Pacheco F., Arcidiacono C., Xompero M., Briguglio R., Agapito G., Busoni L., Fini L., Argomedo J., Gherardi A., Brusa G., Miller D., Guerra J. C., Stefanini P., Salnari P.* Large Binocular Telescope Adaptive Optics System: New achievement sand perspectives in adaptive optics // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8149. P. 814902.
52. *Brusa G., Ashby D. S., Christou J. C., Kern J., Lefebvre M., McMahon T. J., Miller D., Rahmer G., Sosa R., Taylor G., Vogel C., Xianyu Zhang.* Engineering aspects of the Large Binocular Telescope Observatory adaptive optics systems // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. P. 990903. DOI: 10.1117/12.2234733
53. *Christou J. C., Brusa G., Conrad A., Esposito S., Herbst T., Hinz P., Hill J. M., Miller D. L., Rabien S., Rahmer G., Taylor G. E., Veillet C., Zhang X.* Adaptive optics capabilities at the Large Binocular Telescope Observatory // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9909. P. 99092E. DOI: 10.1117/12.2231783
54. *O'Donoghue D. E. et al.* The Image quality of the Southern African Large Telescope (SALT) // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7018. P. 701813-1-15.
55. *Meiring K.* Southern African Large Telescope // Elektron. 2005. January. P. 9—10 [Электронный ресурс]: <<http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/SALT.pdf>>.
56. CANARY's Sodium Laser Guide Star Successfully Commissioned. July, 2016 [Электронный ресурс]: <[http://www.ing.iac.es/PR/press/canary\\_lgs.html](http://www.ing.iac.es/PR/press/canary_lgs.html)>.

57. Geyl R., Cayrel M., Tarreau M. Gran Telescopio Canarias optics manufacture: progress report no. 3 // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5494. DOI: 10.1117/12.553815
58. Eikenberry S. S. et al. MIRADAS for the Gran Telescopio Canarias // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9908. P. 99081L. DOI:10.1117/12.2232533
59. Xiang-Qun Cui, Yong-Heng Zhao, Yao-Quan Chu, Guo-Ping Li, Qi Li, Li-Ping Zhang, Hong-Jun Su, Zheng-Qiu Yao, Ya-Nan Wang, Xiao-Zheng Xing. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) // Research in Astronomy and Astrophysics. 2012. Vol. 12, N 9.
60. Gang Zhao, Yong-Heng Zhao, Yao-Quan Chu, Yi-Peng Jing and Li-Cai Deng. LAMOST spectral survey — An overview // Research in Astronomy and Astrophysics. 2012. Vol. 12, N 7.
61. Yuan H.-B., Liu X.-W., Huo Z.-Y., Xiang M.-S., Huang Y., Chen B.-Q., Zhang H.-H., Sun N.-C., Wang C., Zhang H.-W. LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anticentre (LSS-GAC): target selection and the first release of value-added catalogues // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. Vol. 448, is. 1. P. 855—894 [Электронный ресурс]: <<https://academic.oup.com/mnras/article-abstract/448/1/855/1749593>>.

#### Сведения об авторах

- Виктор Владимирович Клеймёнов** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); главный научный сотрудник;  
E-mail: [klevik2014@yandex.ru](mailto:klevik2014@yandex.ru)
- Елена Владимировна Новикова** — ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); старший научный сотрудник;  
E-mail: [elena.novikova.51@mail.ru](mailto:elena.novikova.51@mail.ru)

Поступила в редакцию  
10.05.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Клеймёнов В. В., Новикова Е. В. Действующие крупногабаритные наземные оптические телескопы наблюдения за космическими объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 10. С. 827—843.

### EXISTING LARGE-SIZED GROUND OPTICAL TELESCOPES FOR SPACE OBJECTS OBSERVATION

V. V. Kleyumonov, E. V. Novikova

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [klevik2014@yandex.ru](mailto:klevik2014@yandex.ru)

Significant scientific and technical advances of recent times in the study of remote regions of the Universe, obtaining images of space and ground-based objects with high resolution became possible thanks to the use of new technologies for the development of large-size optical telescopes. A rise in the main telescope mirror diameter leads to an increase in mass and enhances the possibility of deforming the mirror surface and the telescope's structural elements. This problem can be overcome by using segmented or flexible mirrors, the shape of which is maintained with the use of active optics. However, atmospheric turbulence degrades the quality of images of space objects obtained by ground-based telescopes. To compensate for the influence of the atmosphere, adaptive optics methods are used in most optical telescopes. An overview of the current state of optical telescopes development is presented. Consideration is given to large ground-based optical telescopes with composite and flexible mirrors with aperture diameter exceeding six meters, controlled by adaptive systems. The high resolving and penetrating capabilities achieved during the creation and modernization of large-sized ground-based optical telescopes allow to set and solve new and important scientific and applied problems in the study of space objects of natural and artificial origin. One of these tasks, which has become particularly relevant in recent years, is the detection of small-sized fragments of space debris near spacecraft and orbital space stations.

**Keywords:** optical telescopes, aperture diameter, flexible mirrors, segmented mirrors, active optics, adaptive optical systems

#### REFERENCES

1. Terebizh V.Yu. *Modern Optical Telescopes*, Moscow, 2005, 80 p., [http://terebizh.ru/V.YU.T/publications%5C2005\\_02e.pdf](http://terebizh.ru/V.YU.T/publications%5C2005_02e.pdf).

2. Telescope Optics III: Modern Telescopes, <http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/astr511/lectures/optics3/optics3.html>.
3. Kiriyaenko D.V., Klemyonov V.V., Novikova E.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 7(60), pp. 589–602. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602 (in Russ.)
4. Hart M., Jefferies S., Murphy N. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, pp. 99095N. DOI: 10.1117/12.2235080
5. D'Orgeville C., Fetzer G.J. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, pp. 99090R (18). DOI: 10.1117/12.2234298
6. Gavel D.T. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84470E (7). DOI: 10.1117/12.927023
7. Wood G.E., Roggemann M.C., Welsh B.M. *Proc. SPIE*, 1997, vol. 3125. DOI: 10.1117/12.279025
8. Zihao Xu, Chengliang Yang, Peiguang Zhang, Xingyun Zhang, Zhaoliang Cao, Quanquan Mu, Qiang Sun, Li Xuan. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, pp. 10034, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5577037/>.
9. Marlow W.A., Carlton A.K., Hyosang Yoon, Clark J.R., Haughwout Ch.A., Cahoy K.L., Males J.R., Close L.M., Morzinski K.M. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2017, no. 3(54), pp. 621–639.
10. Laser Guidestar, Adaptive Optics and Laser Guide Star, 2012, [https://budker.uni-mainz.de/?page\\_id=38](https://budker.uni-mainz.de/?page_id=38).
11. Ioannisianni B.K. *Journal of Optical Technology*, 1970, no. 4, pp. 48. (in Russ.)
12. Ioannisianni B.K. *Astrophysical Bulletin*, 1971, vol. 3, pp. 3–19.
13. Williams G.G., Ortiz R., Goble W., Gibson J.D. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9906, pp. 99060V(10).
14. Ulich B.L. *Proc. SPIE*, 1982, vol. 0332, Nov., Advanced Technology Optical Telescopes I.
15. Chin J.C.Y., Wizinowich P., Campbell R., Chock L., Cooper A., Lyke E., Mastromarino J., Martin O., Medeiros D., Morrison D., Neyman Ch., Panteleev S., Stalcup Th., Tucker P., Wetherell E., van Dam M. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84474F (12). DOI: 10.1117/12.925807
16. Meeks R.L., Doyle S., Higginson J., Hudek J.S., Irace W., McBride D., Pollard M., Kuochou Tai, Von Boeckmann T., Wold L., Wold T. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9906, pp. 990603 (18). DOI: 10.1117/12.2233693
17. Wizinowich P.L., Le Mignant D., Bouchez A.H., Campbell R.D., Chin J.C.Y., Contos A.R., van Dam M.A., Hartman S.K., Johansson E.M., Lafon R.E. *Astronomical Society of the Pacific*, 2006, no. 118(840), pp. 297–309, <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/499290>.
18. Chin J.C.Y., Wizinowich P., Wetherell E., Lilley S., Cetre S., Ragland S., Medeiros D., Tsubota K., Doppmann G., Otarola A., Wei K. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, pp. 99090S. DOI: 10.1117/12.2233138
19. Cranston P.G., McBride D., Sarawit A.T., Kan F.W. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9906, pp. 99061G (15). DOI: 10.1117/12.2233937
20. Chin J.C.Y., Wizinowich P., Wetherell E., Cetre S., Campbell R.R., Lilley S., Lyke J., Medeiros D., Rumpy R., Stalcup Th., Tsubota K., Tucker P., Wei K. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9148, pp. 914808 (16). DOI: 10.1117/12.2057449
21. Wizinowich P., Smith R., Biasi R., Cetre S., Dekany R., Femenia-Castella B., Fucik J., Hale D., Neyman Ch., Pescoller D., Ragland S., Stomski P., Andrighttoni M., Bartos R., Bui Kh., Cooper A., Cromer J., van Dam M., Hess M., James E., Lyke J., Rodriguez H., Stalcup Th. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9148, pp. 91482B (12). DOI: 10.1117/12.2055279
22. Jolissaint L., Neyman Ch., Christou J., Wizinowich P. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 844728. DOI: 10.1117/12.926607
23. Hill G.J., Drory N., Good J.M., Lee H., Vattiat B.L., Kriel H., Ramsey J., Bryant R., Elliot L., Fowler J., Häuser M., Landiau M., Leck R., Odewahn St., Perry D., Savage R., Schroeder Mrozinski E., Shetrone M., DePoy D.L., Prochaska T., Marshall J.L., Damm G., Gebhardt K., MacQueen P.J., Martin J., Armandroff T., Ramsey L.W. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9906, pp. 990606 (19).
24. Häuser M., Richter J., Kriel H., Turbyfill A., Buetow B., Ward M. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9906, pp. 990602 (11). DOI: 10.1117/12.2232410
25. Hill G.J., Drory N., Good J.M., Lee H., Vattiat B.L., Kriel H., Ramsey J., Bryant R., Elliot L., Fowler J., Häuser M., Landiau M., Leck R., Odewahn St., Perry D., Savage R., Schroeder Mrozinski E., Shetrone M., De Poy D.L., Prochaska T., Marshall J.L., Damm G., Gebhardt K., MacQueen P.J., Martin J., Armandroff T., Ramsey L.W. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9145, pp. 914506 (19). DOI: 10.1117/12.2231063
26. Chang Jin Oh, Frater E. Lowman A.E., Peng Su, Chunyu Zhao, Ping Zhou, Burge J.H. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9145, pp. 914509 (12). DOI: 10.1117/12.2056879
27. Hill G.J., Booth J.A., Cornell M.E., Good J.M., Gebhardt K., Kriel H.J., Lee H., Leck R., Moreira W., Mac Queen P.J., Perry D.M., Rafal M.D., Rafferty T.H., Ramiller C., Savage R.D., Taylor C.A., Vattiat B.L., Ramsey L.W., Beno J.H., Beets T.A., Esguerra J.D., Häuser M., Hayes R.J., Heisler J.T., Soukup I.M., Zierer J.J., Worthington M.S., Mollison N.T., Wardell D.R., Wedeking G.A. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8444, pp. 84440K (14). DOI: 10.1117/12.925435
28. Briguglio R., Biasi R., Xompero M., Riccardi A., Andrighttoni M., Pescoller D., Angerer G., Gallieni D., Vernet E., Kolb J., Arsenault R., Madec P.-Y. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9148, pp. 914845 (8). DOI: 10.1117/12.2057591
29. *First light for the Four Laser Guide Star Facility on ESO's Very Large Telescope*, April 27.2016, <https://phys.org/news/2016-04-laser-star-facility-eso-large.html>.
30. Macdonald Ch. *The giant lasers so powerful they can create an artificial STAR: Chilean instrument can cut through the atmosphere to give astronomers a clear view*, 27 April 2016, <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3562451/The-giant-lasers-powerful-create-artificial-STAR->



- Chilean-instruments-cut-atmosphere-astronomers-clear-view.html.
31. Malik T. *Zap! This Awesome Laser-Armed Telescope Is Fully Operational*, April 28, 2016, <https://www.space.com/32724-awesome-very-large-telescope-lasers-photos.html>.
  32. Wildi F. *Adaptive Optics in the VLT and ELT era basics of AO*, [http://www.isdc.unige.ch/~paltani/Courses/Instr\\_adaptiveoptics\\_wildi.pdf](http://www.isdc.unige.ch/~paltani/Courses/Instr_adaptiveoptics_wildi.pdf).
  33. *Subaru Telescope Improves its Eye sight by a Factor of Ten*, November 20, 2006, <http://www.naoj.org/Pressrelease/2006/11/20/index.html>.
  34. Guyon O., Hayano Y., Tamura M., Kudo T., Oya S., Minowa Y., Lai O., Jovanovic N., Takato N., Kasdin J., Groff T., Hayashi M., Arimoto N., Takami H., Bradley C., Sugai H., Perrin G., Tuthill P., Mazin B. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9148, pp. 91481R (10). DOI: 10.1117/12.2057273
  35. Hattori M., Shirahata M., Minowa Y., Oya S., Hayano Y., Takami H., Iye M. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84472P(7). DOI: 10.1117/12.927227
  36. Ellerbroek B.L. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2013, no. 34, pp. 121–139.
  37. Oya S., Akiyama M., Hayano Y., Minowa Y., Iwata I., Terada H., Usuda T., Takami H., Nishimura T., Kodama T., Takato N., Tomono D., Ono Y. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84473V (11). DOI: 10.1117/12.926556
  38. Carrasco E.R., Edwards M.L., McGregor P.J., Winge C., Young P.J., Doolan M.C., van Harmelen J., Rigaut F.J., Neichel B., Tranco G., Artigau E., Pessev P., Colazo F., Tigner J., Mauro F., Lührs J., Rambold W.N. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84470N (18). DOI: 10.1117/12.926240
  39. Neichel B., Rigaut F., Serio A., Arriagada G., Boccas M., d'Orgeville C., Fesquet V., Trujillo Ch., Rambold W.N., Galvez R.L., Gausachs G., Vucina T.B., Montes V., Urrutia C., Moreno C., Diggs S.J., Araya C., Lührs J., Tranco G., Bec M., Marchant C., Collao F., Carrasco E., Edwards M., Pessev P., Lopez A.A., Diaz H. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84470W. DOI: 10.1117/12.925915
  40. d'Orgeville C., Diggs S., Fesquet V., Neichel B., Rambold W., Rigaut F., Serio A., Araya C., Arriagada G., Balladares R., Bec M., Boccas M., Duran C., Ebberts A., Lopez A., Marchant C., Marin E., Montes V., Moreno C., Petit Vega P., Segura C., Tranco G., Trujillo C., Urrutia C., Veliz P., Vucina T. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84471Q. DOI: 10.1117/12.925813
  41. Ghez A. *From Nautilus: "Opening a New Window into the Universe"*, April 2017, <https://sciencesprings.wordpress.com/2017/05/25/from-nautilus-opening-a-new-window-into-the-universe/>.
  42. Morzinski K.M., Close L.M., Males J.R., Kopon D., Hinz P.M., Esposito S., Riccardi A., Puglisi A., Pinna E., Briguglio R., Xompero M., Quirós-Pacheco F., Bailey V., Follette K. B., Rodigas T.J., Ya-Lin Wu, Arcidiacono C., Argomedo J., Busoni L., Hare T., Uomoto A., Weinberger A. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9148, pp. 914804. DOI: 10.1117/12.2057048
  43. Morzinski K.M., Close L.M., Males J.R., Hinz P.M., Esposito S., Riccardi A., Briguglio R., Follette K.B., Pinna E., Puglisi A., Vezilj J., Xompero M., Ya-Lin Wu. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, pp. 990901 (17). DOI: 10.1117/12.2233911
  44. Close L.M., Males J.R., Kopon D.A., Gasho V., Follette K.B., Hinz Ph., Morzinski K., Uomoto, Hare T., Riccardi A., Esposito S., Puglisi A., Pinna E., Busoni L., Arcidiacono C., Xompero M., Briguglio R., Quiros-Pacheco F., Argomedo J. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8447, pp. 84470X (16). DOI: 10.1117/12.926545
  45. Gamma E. *Sky&Telescope*, 2013, April, pp. 26–30, <http://eaglegamma.com/wp-content/uploads/2013/09/LZT.pdf>.
  46. Andersen G. *The Telescope. Its History, Technology and Future*, Princeton University Press, 2007, 165 p., <https://science.howstuffworks.com/engineering/structural/10-strange-structural-engineering-marvels5.htm>.
  47. Hickson P., Borrab E., Cabanac R., Chapman S., de Lapparent V., Murooney M., Walker G. *Proc. of SPIE*, 1998, vol. 3352, pp. 226–232.
  48. Hill J.M., Ashby D.S., Brynnel J.G., Christou J.C., Little J.K., Summers D.M., Veillet C., Wagner R.M. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9145, pp. 914502 (12). DOI: 10.1117/12.2055218
  49. Ashby D.S., Biddick Ch., Hill J.M. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9145, pp. 91452S (16). DOI: 10.1117/12.2057193
  50. Hill J.M., Green R.F., Ashby D.S., Brynnel J.G., Cushing N.J., Little J.K., Slagle J.H., Wagner R.M. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8444, pp. 84441A(12). DOI: 10.1117/12.926636
  51. Esposito S., Riccardi A., Pinna E., Puglisi A., Quirós-Pacheco F., Arcidiacono C., Xompero M., Briguglio R., Agapito G., Busoni L., Fini L., Argomedo J., Gherardi A., Brusa G., Miller D., Guerra J.C., Stefanini P., Salmari P. *Proc. of SPIE*, 2011, vol. 8149, pp. 814902.
  52. Brusa G., Ashby D.S., Christou J.C., Kern J., Lefebvre M., McMahon T.J., Miller D., Rahmer G., Sosa R., Taylor G., Vogel C., Xianyu Zhang. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, p. 990903. DOI: 10.1117/12.2234733
  53. Christou J.C., Brusa G., Conrad A., Esposito S., Herbst T., Hinz P., Hill J.M., Miller D.L., Rabien S., Rahmer G., Taylor G.E., Veillet C., Zhang X. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9909, pp. 99092E. DOI: 10.1117/12.2231783
  54. O'Donoghue D.E. et al. *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 7018, pp. 701813-1-15.
  55. Meiring K. *Elektron*, 2005, January, pp. 9–10, <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/SALT.pdf>.
  56. *CANARY's Sodium Laser Guide Star Successfully Commissioned*, July, 2016, [http://www.ing.iac.es/PR/press/canary\\_lgs.html](http://www.ing.iac.es/PR/press/canary_lgs.html).



57. Geyl R., Cayrel M., Tarreau M. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5494. DOI: 10.1117/12.553815
58. Eikenberry S.S. et al. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9908, pp. 99081L. DOI:10.1117/12.2232533
59. Xiang-Qun Cui, Yong-Heng Zhao, Yao-Quan Chu, Guo-Ping Li, Qi Li, Li-Ping Zhang, Hong-Jun Su, Zheng-Qiu Yao, Ya-Nan Wang, Xiao-Zheng Xing. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, no. 9(12).
60. Gang Zhao, Yong-Heng Zhao, Yao-Quan Chu, Yi-Peng Jing and Li-Cai Deng. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, no. 7(12).
61. Yuan H.-B., Liu X.-W., Huo Z.-Y., Xiang M.-S., Huang Y., Chen B.-Q., Zhang H.-H., Sun N.-C., Wang C., Zhang H.-W. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, no. 1(448), pp. 855–894, <https://academic.oup.com/mnras/article-abstract/448/1/855/1749593>.

**Data on authors**

- Victor V. Kleymyonov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Principle Scientist; E-mail: [klevik2014@yandex.ru](mailto:klevik2014@yandex.ru)
- Elena V. Novikova** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Scientist; E-mail: [elena.novikova.51@mail.ru](mailto:elena.novikova.51@mail.ru)

**For citation:** Kleymyonov V. V., Novikova E. V. Existing large-sized ground optical telescopes for space objects observation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 10. P. 827—843 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-10-827-843