

ЭКСТРЕМАЛЬНО БОЛЬШИЕ НАЗЕМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

В. В. КЛЕЙМЁНОВ, Е. В. НОВИКОВА

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

Представлен обзор современного состояния процессов проектирования и строительства трех наземных экстремально больших телескопов — ELT, TMT, GMT, работа которых невозможна без систем адаптивной оптики. Рассмотрены современные технологии применения адаптивных оптических систем, которые будут включены в состав оптико-электронных комплексов экстремально больших телескопов.

Ключевые слова: *экстремально большие телескопы, оптические телескопы, ELT, TMT, GMT, диаметр апертуры, анизопланатизм, фазовая коррекция, адаптивная оптика, лазерные опорные звезды, мультисопряженные АОС, АОС приземного слоя, мультиобъектные АОС*

Введение. В США, странах Евросоюза, Японии, Китае, Канаде ведутся активные работы по созданию экстремально больших оптических телескопов. Особое внимание при их разработке уделяется развитию и применению современных технологий адаптивной оптики на основе сложных алгоритмов обработки принимаемого излучения лазерных и естественных опорных звезд для последующего расчета формы зеркал в реальном масштабе времени.

За последние пятьдесят лет в мире построено 14 наземных оптических телескопов с апертурой 6, 8 и 10 м (так называемых „очень больших оптических телескопов“). Опираясь на предыдущий опыт, астрономы с начала 2000-х гг. начали изучать возможность построения телескопов с зеркалами диаметром более 20 м. В настоящее время в процессе проектирования и строительства находятся три экстремально больших телескопа — Европейский экстремально большой телескоп (ELT), Тридцатиметровый телескоп (TMT) и Гигантский Магелланов телескоп (GMT). Ни один из них не может работать без систем адаптивной оптики, ибо по мере увеличения апертуры из-за вносимых атмосферой искажений все в большей степени снижается качество изображения.

В своем развитии адаптивная оптика прошла несколько этапов — от идеи, высказанной американским астрономом Г. Бэбкоком [1] в 1953 г., о возможности устранения оптических искажений, вызванных атмосферой в реальном времени, и предложения советского ученого В. П. Линника [2] в 1957 г. о применении сегментированного зеркала для компенсации искажений при астрономических наблюдениях, которое получило практическое развитие при создании 1,2-метрового телескопа [3], до ее современного состояния.

К этапам развития адаптивной оптики относятся:

— разработка теоретических основ, численное моделирование и проведение в 1970—90-е гг. экспериментов по подтверждению возможности ее практической реализации;

— экспериментальные исследования по применению лазерной опорной звезды в небольших телескопах в течение 1990-х гг.;

— и наконец, масштабное внедрение с конца 1990-х гг. адаптивных оптических систем (АОС) на телескопах 8—10-метрового класса, первым из которых был телескоп КексII.

Истории развития адаптивной оптики, анализу проблем и достигнутых теоретических и экспериментальных результатов посвящено множество исследований и аналитических обзоров. Среди последних выделим работы [3, 4], в которых приводится, в частности, обширная библиография.

Современные технологии применения АОС. Одной из первых проблем, с которой пришлось столкнуться при внедрении адаптивной оптики, стала ограниченность угла изопланатизма в АОС (телесного угла между направлением на опорный источник излучения и направлением на наблюдаемый объект, в пределах которого эффективна фазовая коррекция атмосферных возмущений). Среди первых теоретических исследований, посвященных рассмотрению данной проблемы, особое место занимают работы Д. Фрида, прежде всего [5, 6], в которых автор, опираясь на работы советских ученых А. Н. Колмогорова и В. И. Татарского, вводит определение радиуса когерентности атмосферы r_0 (известного как „радиус когерентности Фрида“) и угла изопланатизма $\theta_{из}$:

$$r_0 = \left(0,423 k^2 \sec \beta \int_0^H C_n^2(h) dh \right)^{-3/5};$$

$$\theta_{из} = \left(2,91 k^2 (\sec \beta)^{8/3} \int_0^H C_n^2(h) h^{5/3} dh \right)^{-3/5},$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, β — зенитный угол, C_n — структурная постоянная показателя преломления атмосферы, h — высота турбулентного слоя атмосферы, H — высота от поверхности Земли до наблюдаемого объекта.

Введенные характеристики позволяют наглядно продемонстрировать снижение эффективности работы телескопа при увеличении его диаметра D относительно радиуса когерентности r_0 . На рис. 1 [7] представлены графики зависимости коэффициента Штреля St от отношения D/r_0 при различной степени коррекции искажений принимаемого волнового фронта, здесь кривая A — без коррекции; B — коррекция наклона; C — коррекция наклона и фокуса; D — коррекция наклона, фокуса и астигматизма; E — коррекция наклона, фокуса, астигматизма и комы; F — коррекция 21 полинома Цернике. Сплошные кривые показывают результаты численного моделирования коэффициента Штреля, рассчитанного как отношение средней интенсивности излучения на оси оптической системы в случайно-неоднородной среде к интенсивности в вакууме. Пунктирные кривые отражают результаты вычисления коэффициента Штреля по упрощенной формуле $St = \exp(-\sigma^2)$, где σ — среднеквадратическая по апертуре остаточная фазовая ошибка волнового фронта после фазовой коррекции [8]. Анализ графиков позволяет в первом приближении оценить размер и количество субапертур (сегментов), на которое должна разбиваться апертура телескопа, и требуемое число элементов управления (коррекции) телескопом.

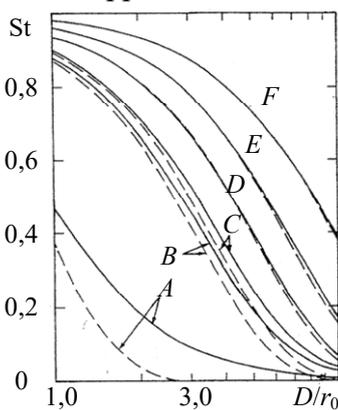


Рис. 1

При хорошем астроклимате величина угла изопланатизма составляет 2—3". Влияние углового анизопланатизма можно оценить с помощью выражения для среднеквадратической ошибки $\sigma_{из}$, обусловленной углом $\theta_{из}$ между направлением на опорную звезду (естественную или искусственную) и направлением на наблюдаемый объект, отнесенным к углу изо-

планатизма: $\sigma_{из}^2 = (\theta/\theta_{из})^{5/3}$ [4]. Как показали результаты теоретического анализа и результаты расчетов [7], влияние углового анизопланатизма имеет особенно выраженный характер при увеличении отношения D/r_0 , т.е. для больших апертур оптических телескопов.

Для снижения влияния углового анизопланатизма и увеличения углового поля зрения крупноапертурного телескопа была разработана технология создания мультисопряженной адаптивной оптики (МСАО) [9, 10].

В системе МСАО (рис. 2) используются два (или несколько) деформируемых зеркала (DM) в процессе коррекции aberrаций волнового фронта. Каждое зеркало оптически сопряжено с соответствующим слоем атмосферы на определенном расстоянии от телескопа и корректирует aberrации, создаваемые данным слоем атмосферы. Это расстояние часто называют высотой сопряжения, хотя более подходит термин „диапазон сопряжения“. Сигналы, управляющие деформируемыми зеркалами, поступают от нескольких датчиков волнового фронта (WFS), на каждый из которых приходит излучение „своих“ опорных звезд (GS). Эта информация обрабатывается, чтобы сначала восстановить трехмерную структуру профиля атмосферной турбулентности, а затем рассчитать форму зеркал. Необходимо отметить, что задача восстановления трехмерного профиля (атмосферная томография) математически строго некорректна, и для преодоления некорректности следует применять методы решения обратных задач, такие как регуляризация.

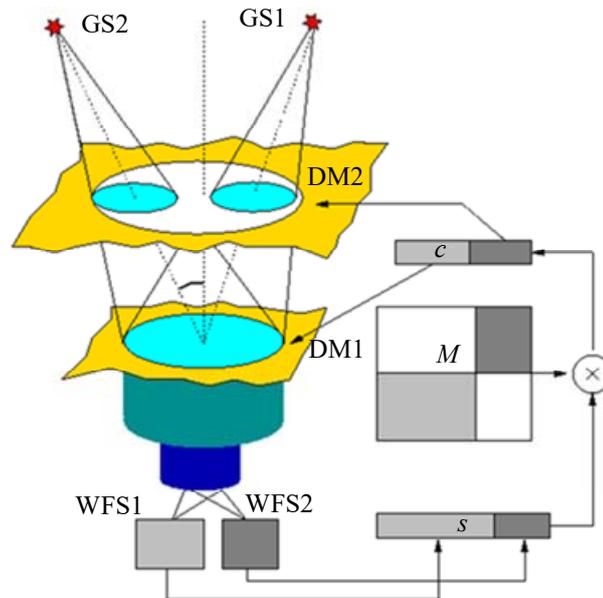


Рис. 2

Принцип работы системы МСАО был показан на демонстраторе MAD (Multiconjugate Adaptive optics Demonstrator) [11], производящем коррекцию атмосферных турбулентностей в реальном времени посредством нескольких управляемых деформируемых зеркал в более широком поле обзора (в $2'$), чем классические системы, в которых используется только одно деформируемое зеркало (с полем в несколько десятков угловых секунд). В 2011 г. система МСАО с несколькими лазерными и естественными звездами была внедрена на телескопе Gemini в Чили [12]. Разработанная технология применения МСАО в телескопах 8—10-метрового класса будет использована в телескопе ELT с 39-метровой апертурой.

Значительный интерес представляют и АО с широким полем зрения (от $2 \times 2'$ до $(10-20) \times (10-20)'$) — так называемые приземные АО, или АО приземного слоя — GLAO (Ground Layer Adaptive Optics). Система GLAO исправляет только оптическую aberrацию, вызванную атмосферной турбулентностью на высоте до 500 м [13—16]. Эта система состоит из одного деформируемого зеркала, оптически сопряженного с определенной высотой над

поверхностью Земли, и нескольких датчиков волнового фронта, измеряющих его аберрации в направлениях к нескольким опорным звездам. Опорные звезды могут быть комбинацией естественных и лазерных звезд (NGS и LGS соответственно).

Первые результаты применения системы GLAO в 8-метровых телескопах с несколькими опорными звездами были получены в 2007 г. [14]. Использование системы в 6,5-метровом телескопе MMT с пятью рэлеевскими лазерными опорными звездами, расположенном на высоте 2,6 км в Аризоне, позволило улучшить угловое разрешение примерно в 3 раза — до 0,22" [13, 15]. Применение GLAO с тремя рэлеевскими лазерными опорными звездами в 8,4-метровом телескопе LBT (Large Binocular Telescope), расположенном на высоте 3,2 км, показало, что при хороших условиях разрешение может быть улучшено в два раза [16].

Система GLAO, использующая несколько натриевых лазерных опорных звезд, установлена на телескопе VLT (Very Large Telescope). В 2017 г. в процессе оптических наблюдений посредством GLAO угловое разрешение было улучшено с 1 до 0,6" по всему полю зрения в 1' [16].

Система GLAO может использоваться в сочетании с мультиобъектной системой адаптивной оптики MOAO (Multi-object AO), которую также планируется установить на телескопах нового поколения — экстремально больших оптических телескопах. Концепция системы MOAO похожа на концепцию мультисопряженной MCAO. В ней также используются несколько деформируемых зеркал, производящих независимую коррекцию искажений волнового фронта в направлении нескольких опорных звезд (естественных и искусственных), расположенных по более широкому полю зрения (до 5—10') [17, 18]. Каждое деформируемое зеркало оптимально изменяет форму для коррекции турбулентности в направлении визирования с помощью атмосферной томографии. Система MOAO отличается от MCAO тем, что несколько деформируемых зеркал параллельно корректируют фазовые искажения во всех точках поля зрения („пути“), а не последовательно в разных слоях атмосферы. Первая система MOAO была установлена на 8,2-метровом телескопе Субару (Subaru) и в процессе работы в течение 2014—2015 гг. продемонстрировала высокую эффективность [17].

В целом 30-летняя эксплуатация АОС в 8—10-метровых телескопах показала хорошие результаты, что способствовало приобретению опыта, необходимого при разработке строящихся экстремально больших телескопов [19—25].

Экстремально большой телескоп — Extremely Large Telescope (ELT). В горах Cerro Armazones (Северные Анды) в Чили на высоте 3060 м строится телескоп ELT Европейской южной обсерватории (European Southern Observatory — ESO) — самый современный оптический телескоп наземного базирования в мире (рис. 3). Свое название телескоп получил в 2017 г., сменив первоначальное название E-ELT (European-Extremely Large Telescope). Его новое имя отражает растущее количество интернациональных партнеров ESO. Программа создания ELT была утверждена в 2012 г., завершение строительства намечено на 2025 г. [26—29].

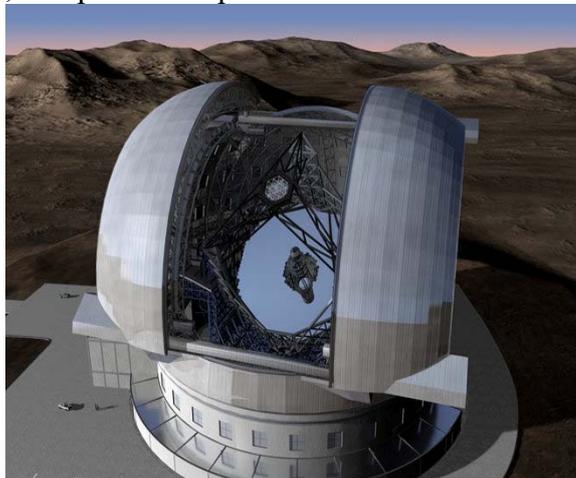


Рис. 3

Ранние проекты ELT включали сегментированное основное зеркало диаметром 42 м и вторичное зеркало 5,9 м. В 2011 г. для снижения стоимости и сокращения времени строительства по решению ESO размер основного зеркала был уменьшен до 39,3 м, а вторичного — до 4,2 м.

Зеркальная конструкция основана на новой схеме с пятью (или шестью) зеркалами. Первые три зеркала несферические и формируют трехзеркальный анастигмат для достижения высокого качества изображения по всему полю обзора. Трехзеркальный анастигмат позволяет, во-первых, минимизировать три основные оптические аберрации — сферическую, кому и астигматизм, и, во-вторых, получить широкое поле обзора ($10'$), намного большее, чем это возможно для телескопов только с одной или двумя искривленными поверхностями [30].

Главное зеркало ELT диаметром 39 м будет состоять из 798 отдельных шестиугольных сегментов. Ширина каждого сегмента 1,4 м, толщина 5 см. Собирающая площадь телескопа — 978 м^2 . Опорная конструкция должна с прецизионной точностью удерживать 798 сегментов главного зеркала (с погрешностью до нескольких нанометров). Для этого положение каждого сегмента относительно соседних измеряется с помощью датчиков, размещенных на краях сегментов („датчиков края“), и с помощью 2394 приводов (по 3 на каждый сегмент) устраняются деформации поверхности зеркала, вызванные внешними факторами — влиянием ветра, гравитацией и изменением температуры. Так как гравитационная сила, действующая на конструкцию при почти вертикальном положении зеркала, отличается от силы, действующей при расположении зеркала в горизонтальной плоскости, то при вращении зеркала сила тяжести также изменяется. Для устранения возникающих аберраций форма сегментов постоянно корректируется. И наконец, что не менее важно, должна быть обеспечена возможность замены сегментов зеркала каждые 18 месяцев, что сводится к замене двух сегментов каждый день. Элементы опорной системы сегментов для главного зеркала спроектированы и произведены фирмами CESA (Испания) и VDL (Нидерланды). В январе 2017 г. ESO заключила контракт для изготовления 4608 „датчиков края“ с консорциумом FAMES.

Позднее в том же году ESO заключила два дополнительных контракта. Один — с фирмой „Schott AG“, которая изготовит „болванки“ для 798 сегментов, а также дополнительно запасной комплект из 133 сегментов для обслуживания, что позволит заменять и чистить сегменты на вращающемся основании в процессе работы ELT. Зеркало будет отлито из керамики церодур с низким коэффициентом расширения, как и зеркало существующего телескопа VLT. Второй контракт был заключен с французской компанией „Safran Electronics & Defense“, которая по получении зеркальных „болванок“ от фирмы „Schott“ и будет выполнять полировку одного зеркального сегмента в день в соответствии с семилетним сроком завершения проекта. В ходе этого процесса каждый сегмент будет полироваться до тех пор, пока среднеквадратический показатель неровности поверхности не станет меньше 7,5 нм. После этого „Safran“ смонтирует, протестирует и завершит всю проверку оптики перед поставкой.

Опорная конструкция для главного зеркала, разработанная фирмой TNO (Нидерланды), напоминает разветвленное дерево (рис. 4): три опоры, на каждой из которых размещены еще три, причем каждая — с тремя опорными точками. Каждая из первых трех опор имеет привод, и вместе они удерживают зеркало в нужном положении. Таким образом, имеется примерно 2400 исполнительных механизмов, совместно управляющих главным зеркалом [31].

В 2018 г. первые шесть шестиугольных сегментов для главного зеркала ELT были успешно отлиты в Германии.

Изготовление вторичного зеркала является основной проблемой создания ELT, поскольку это зеркало сильно выпуклое и асферическое, а также очень большое, 4,2 м в диаметре, и весит 3,5 т. Отмечается, что оно будет самым большим вторичным зеркалом, когда-либо использованным в телескопостроении, и самым большим выпуклым зеркалом, когда-либо изготовленным. Для изготовления зеркальной заготовки из церодура для вторичного зеркала

ESO был заключен контракт с фирмой “Schott AG”. Сложные элементы опоры, необходимые для обеспечения правильной формы и положения вторичного и третичного зеркал, будут изготовлены фирмой SENER (Испания). Предварительно подготовленные стеклокерамические заготовки для вторичного зеркала затем будут отполированы и протестированы фирмой “Safran”. Неровности оптической поверхности не должны превышать 15 нм.



Рис. 4

Особенность телескопа — 3,8-метровое вогнутое третичное зеркало, также изготовленное из церодура. В самых современных больших телескопах, включая наземный VLT и космический телескоп „Хаббл“, используются всего два асферических зеркала для формирования изображения. В некоторых случаях плоское третичное зеркало небольшого диаметра вводится для отклонения света к центру. Однако в ELT третичное зеркало также имеет кривую поверхность, поскольку использование трех зеркал обеспечивает лучшее качество результирующего (конечного) изображения по большому полю зрения, чем было бы возможно с конструкцией из двух зеркал. Назначение третичного зеркала — ежеминутно корректировать форму зеркала во время работы телескопа. Коррекция осуществляется с помощью силовых приводов и направлена на поддержание оптимального качества изображения.

Так называемый предфокальный блок (PreFocal Station) — это гигантская оптико-механическая многоцелевая система, перенаправляющая световой луч, поступающий в телескоп, на различные анализирующие приборы, установленные в фокальной плоскости. Иными словами, это опора для нескольких зеркал, составляющих зеркальный блок М4, содержащий адаптивные третье, четвертое и пятое зеркала.

Четвертое, пятое и, возможно, шестое зеркала — почти плоские. Зеркало М4 обеспечивает адаптивную оптическую коррекцию атмосферных искажений, а зеркало М5 — коррекцию наклона в двух плоскостях для стабилизации изображения. Пятое и шестое зеркала также направляют свет к одному из фокусов Нэсмита, позволяя нескольким устройствам работать одновременно. Четвертое 2,4-метровое зеркало — гибкое адаптивное зеркало толщиной 2 мм. Если число приводов составляет 8000, поверхность может меняться с требуемой частотой. Деформируемое зеркало будет самым большим когда-либо сделанным адаптивным зеркалом. Пятое зеркало — плоское или почти плоское, монолитное (предположительно), диаметром 2,6 м.

Блок адаптивных зеркал (М4, М5, возможно и М6) позволит обеспечить в реальном времени адаптивную коррекцию вызванных атмосферной турбулентностью искажений изображений звезд, а также частично нейтрализовать вибрацию телескопа, вызванную ветром, и статические аберрации. Четвертое зеркало также обеспечит выбор фокуса Нэсмита [32, 33].

Предполагается, что вся система зеркал телескопа ELT будет работать следующим образом (рис. 5) [34]:

- 39,3-метровое главное зеркало М1 примет излучение астрономического объекта и направит его к меньшему зеркалу М2, расположенному над ним;
- 4,2-метровое вторичное зеркало М2 отразит свет к зеркалу М3, расположенному около главного зеркала;
- третье зеркало М3 направит свет к адаптивному плоскому зеркалу М4, расположенному непосредственно над ним;
- адаптивное зеркало М4 будет с частотой 1 кГц корректировать искажения, вызванные атмосферной турбулентностью;
- пятое зеркало М5 и, возможно, шестое М6, установленные на подвижной платформе, стабилизируют изображение и направят свет к камерам и другим инструментам, установленным на неподвижной (стационарной) платформе.

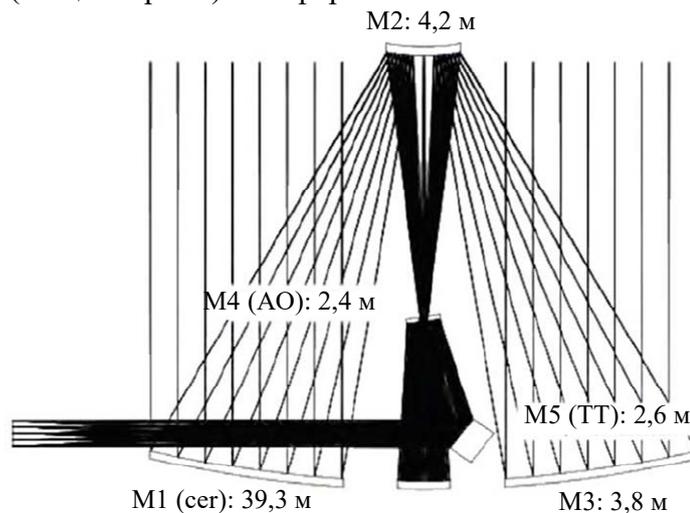


Рис. 5

Система адаптивной оптики ELT позволит повысить разрешение в 500 раз по сравнению с наблюдением, достигнутым без адаптивной оптики. Концепция телескопа предполагает, что он будет состоять из отдельных модулей, так что каждый элемент можно будет изготовить в больших количествах — это существенно уменьшит общую стоимость. Только при таком подходе возможно построить ELT в условиях ограниченного финансирования.

2800-тонная телескопическая система сможет поворачиваться на 360° .

В 2015 г. были утверждены первые приборы для телескопа.

MAORY — блок мультисопряженной адаптивной оптики (Multiconjugate Adaptive Optics Relay for the ELT) [35—37]. Это новый модуль адаптивной оптики, основанный на системе МСАО, апробированной ранее, как отмечалось выше, на телескопах VLT и Gemini [12]. Предполагается, что блок MAORY будет использовать излучение шести натриевых лазерных опорных звезд и трех естественных звезд для определения искажений волнового фронта высокого и низкого порядка соответственно для восстановления трехмерных изображений турбулентной атмосферы. MAORY предназначен для работы с камерой формирования изображения MICADO.

MICADO — мультисопряженная адаптивная оптическая камера формирования изображения для наблюдений в широком поле обзора (Multi-AO Imaging Camera for Deep Observations) [38, 39]. Работа системы MICADO будет эффективна при стабильных и ярких изображениях звезд по всему полю зрения в ближнем ИК-диапазоне (0,8—2,4 мкм), что позволит обеспечить точные измерения их яркости. Также MICADO обеспечит получение дифракционно-ограниченного изображения в ближнем ИК-диапазоне. Это мощный инструмент для решения таких задач, как измерение масс центральных черных дыр соседних галактик по скоростям их звезд, наблюдение высокого красного смещения галактик для вычисления их

возраста, химического состава и объяснения истории развития. При помощи этого инструмента также будут получены спектры сверхновых звезд, рожденных первым поколением крупных звезд во Вселенной.

HARMONI — монолитный оптический спектрограф с высоким угловым разрешением и ИК-интегральным полем (High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph) — один из первых установленных на телескопе приборов, который будет функционировать в диапазоне длин волн 0,47—2,45 мкм [40, 41].

METIS — блок формирования изображений и спектрограф среднего инфракрасного диапазона (Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph) [42].

Переключение принимаемого излучения с одного прибора на другой будет занимать несколько минут, что обеспечит возможность наблюдения в широком диапазоне длин волн — от видимого до среднего инфракрасного.

Ожидается, что благодаря мощным АОС, позволяющим корректировать атмосферную турбулентность, ELT сможет получать изображения экзопланет вокруг далеких звезд, что практически невозможно при использовании существующих телескопов.

Тридцатиметровый телескоп — Thirty Meter Telescope (TMT). Тридцатиметровый телескоп TMT является экстремально большим оптическим инфракрасным телескопом с почти дифракционным разрешением, который определит направление развития астрономии в северном полушарии на следующие 50 лет [43—45]. TMT разрабатывается консорциумом университетов, фондов и национальных обсерваторий США, Канады, Китая, Индии и Японии. Окончание строительства намечено на 2027 г. (рис. 6).

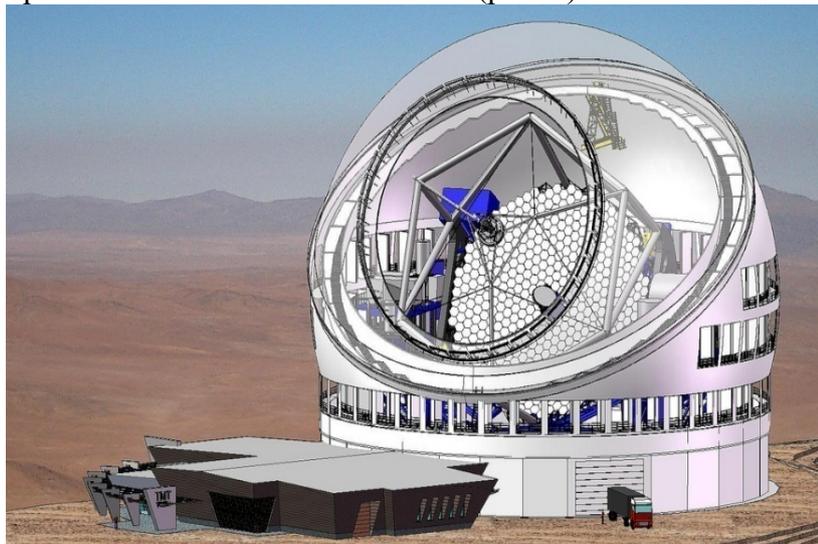


Рис. 6

TMT будет размещен на самой большой высоте относительно высот размещения существующих и перспективных экстремально больших телескопов и будет вторым по величине телескопом после ELT. TMT предназначен для работы в диапазоне от 0,31 до 28 мкм. Его собирающая площадь 655 м², фокусное расстояние 450 м (относительное отверстие $f/15$). Телескоп имеет оптическую конструкцию Ричи — Кретьена с 30-метровым основным зеркалом. Это зеркало должно быть сегментированным и состоять из 492 отдельных гексагональных зеркал размером 1,44 м. Формой каждого сегмента, а также его положением относительно соседних будет управлять система активной оптики. 3,6-метровое вторичное зеркало должно обеспечивать поле обзора в 20'. Плоское третичное зеркало размером 2,5×3,5 м должно направлять свет к инструментам, установленным на большой платформе. Телескоп должен иметь альт-азимутальную монтажную опору.

Составной частью TMT является система МСАО [46—48], содержащая два деформируемых зеркала. МСАО будет измерять фазовые искажения, вызванные атмосферной турбу-

лентностью, посредством наблюдения за комбинацией естественных и искусственных лазерных опорных звезд. На основе этих измерений с помощью двух деформируемых зеркал будет осуществляться в реальном времени коррекция оптических искажений волнового фронта. Это позволит получить почти дифракционно-ограниченное изображение в поле зрения примерно в $30''$.

К приборам первого поколения для ТМТ, использующим адаптивную оптику, относятся ИК-блок формирования изображений и спектрограф IRIS (Infrared Imager and Spectrograph) и ИК многощелевой спектрограф IRMS (Infrared Multi slit Spectrograph) [49]. IRIS, работающий в ближней ИК-области спектра и спроектированный для достижения дифракционного предела телескопа, будет включать интегральный полевой (integral field) спектрограф и камеру формирования изображения (с полем $34 \times 34''$) с высоким пространственным разрешением, достигаемым благодаря адаптивной оптической системе NFIRAOS (Narrow Field InfraRed Adaptive Optics System), работающей в ИК-диапазоне с узким полем зрения с угловым разрешением в четырех диапазонах ($0,004, 0,009, 0,025, 0,05''$) [50]. Эти устройства позволят решать широкий спектр астрофизических научных задач, таких как изучение солнечной системы и экзопланет, процессы формирования звездных систем, физика сверхбольших черных дыр, состав и происхождение галактик (от соседних до галактик высокого красного смещения).

Система NFIRAOS, проектируемая и создаваемая Национальным исследовательским центром Канады [51], будет принимать свет, собранный главным зеркалом телескопа, корректировать атмосферную турбулентность и некоторые аберрации самого телескопа и передавать скорректированное излучение на три устройства, входящие в состав телескопической системы ТМТ. Система NFIRAOS позволит получать дифракционно-ограниченные изображения в ИК-диапазоне в поле $17\text{—}30''$ с 50 %-ным обзором неба в галактическом поясе. Это достигается благодаря, во-первых, измерению и коррекции волнового фронта двумя сопряженными деформируемыми зеркалами примерно с 8000 приводов, во-вторых, шести натриевым лазерным опорным звездам в поле размером $70''$ и, в-третьих, трем ИК-датчикам волнового фронта низкого порядка (корректирующим наклоны в двух перпендикулярных плоскостях или наклоны в двух перпендикулярных плоскостях и сдвиг), работающим по излучению естественных опорных звезд, расположенных в пределах поля размером $\sim 2'$.

Созвездие из лазерных опорных звезд будет генерировано с помощью излучения шести 20—25-ваттных лазеров через оптическую систему диаметром 0,4 м, расположенную позади вторичного зеркала ТМТ [52].

Гигантский Магелланов телескоп — Giant Magellan Telescope (GMT). Гигантский Магелланов телескоп — наземный экстремально большой оптический телескоп, строительство которого намечено завершить в 2025 г., а ввести в эксплуатацию — в 2029 г. Он будет расположен в обсерватории Лас Кампанас в Чили на высоте 2516 м. Рабочий диапазон длин волн — от 0,32 до 25 мкм. Телескоп разрабатывается консорциумом, возглавляемым США [53—55].

В GMT, в отличие от двух других экстремально больших телескопов, планируется использовать в качестве собирающего свет элемента систему из семи больших зеркал („сегментов“, по терминологии разработчиков) из боросиликатного стекла, каждое из которых имеет диаметр 8,4 м и весит 20 т, что создаст эффективную апертуру в 24,5 м, а собирающую площадь 368 м^2 (рис. 7). За счет особенности отливки задняя поверхность зеркал имеет сотовидную структуру, что позволяет на 85 % облегчить их вес.

Принимаемое семью вторичными зеркалами излучение от семи первичных зеркал будет направлено через центральное первичное зеркало на усовершенствованные ССД-камеры (устройства с зарядовой связью).

Изготовление зеркал сопряжено с рядом технических проблем. Размер 8,4 м близок к максимально допустимому для монолитного зеркала, на изготовление которого влияют такие факторы, как время, необходимое для охлаждения стекла после отливки, вес зеркала и риск

поломки при транспортировке и установке. Это отличает GMT от TMT и ELT, в которых используется большое количество сегментов для создания главного зеркала.



Рис. 7

Одно из зеркал будет установлено на центральной оси телескопа. Другие шесть зеркал предполагается установить вокруг центрального зеркала. Каждое зеркало монтируется в свою собственную „ячейку“ — сложную систему юстировки, которая постоянно удерживает зеркало в правильном положении относительно других зеркал и поддерживает его точную форму при различных температурах внутри корпуса.

GMT — телескоп системы Грегори. Самым сложным аспектом создания зеркальных сегментов GMT является асимметричная форма шести внешних сегментов. Эти зеркала имеют круто изогнутую форму. Максимальное отклонение от симметричного зеркала составляет 14 мм на краю.

Шесть зеркал будут располагаться вокруг одного центрального и составлять внеосевую оптическую систему. В связи с этим возникает сложность при их изготовлении, так как, хотя все семь зеркал одного диаметра, они не будут радиально симметричны, что обуславливает необходимость изменений в обычных методиках полировки и испытаний. Поэтому при изготовлении стеклянная заготовка помещается в гигантскую вращающуюся печь, где она подвергается центробежному формованию, что придает стеклу естественную параболическую форму. Это значительно уменьшает время шлифовки, необходимое для придания формы стеклу, а также снижает вес. Для обеспечения возможности вращения зеркала будет установлено примерно 1750 алюминиево-кремниевых стержней [56, 57].

Общий диаметр составного вторичного зеркала равен 3,3 м, диаметр каждого вторичного (гибкого) зеркала 1,1 м. Относительное отверстие составного вторичного зеркала в целом равно $f/0,71$, относительное отверстие отдельных зеркал (сегментов) составляет $f/2,14$. Профилем поверхности каждого вторичного гибкого зеркала будут управлять свыше 7000 приводов с частотой более 1 кГц.

GMT будет иметь несколько типов систем адаптивной оптики. Система GLAO позволит выполнить коррекцию в большом поле зрения ($\geq 10'$). Система NGS AO (Natural Guide Star AO) — адаптивная система, работающая по естественной опорной звезде, обеспечит фазовую коррекцию в спектральном диапазоне от красного до среднего инфракрасного в небольшом поле зрения (20—30"). Для устранения углового анизопланатизма и увеличения поля зрения телескопа будет применена АОС с лазерной томографией (Laser Tomography AO) [58—60], принимающая излучение шести лазерных опорных звезд и одной естественной звезды для последующей фазовой коррекции атмосферных искажений в диапазоне спектра от среднего до дальнего ИК.

Для обеспечения дифракционного качества изображения пары зеркал M1—M2 должны быть сфазированы с точностью до малых долей рабочей длины волны. Для достижения этого уровня коррекции в поле зрения менее 9" система фазирования использует излучение нескольких (от 6 до 10) естественных опорных звезд, с помощью которых на низких частотах (~0,033 Гц) будут измерены относительные фазовые сдвиги зеркал в ИК-диапазоне и фазовые aberrации низкого порядка в видимом диапазоне.

Общая стратегия фазировки и требования к работе с опорными естественной и лазерной звездами приведены в работе [53], где также представлены первые оценки ошибки сдвига сегмента, вызванного ветром.

Создание GMT находится в стадии проектирования и изготовления комплектующих устройств и узлов. Два из семи 8,4-метровых зеркал готовы и находятся на хранении, три зеркала — на различных стадиях шлифовки и полировки, а пятое зеркало — в отливке.

Преимущества, которые GMT будет иметь перед двумя другими экстремально большими телескопами, заключаются в компактной оптической схеме и более широком поле зрения, что облегчает задачу создания обычных приборов: спектрографов, камер. Одним из первых изготовленных инструментов будет высокоточный спектрометр высокого разрешения.

Заключение. Представлен обзор современного состояния процессов проектирования и создания трех наземных экстремально больших оптических телескопов — ELT, TMT, GMT. Особое внимание при их разработке уделяется развитию и применению современных технологий адаптивной оптики на основе сложных алгоритмов обработки принимаемого излучения лазерных и естественных опорных звезд для восстановления 3-мерной структуры всего слоя атмосферной турбулентности с целью последующего расчета профиля формы зеркал в реальном масштабе времени. Такие технологии уже сейчас внедрены на крупноапертурных оптических телескопах и реализуются на строящихся экстремально больших телескопах для достижения высокого качества изображения в широком поле зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vabcock H. W.* The possibility of compensating astronomical seeing // The Astronomical Society of the Pacific. 1953. Vol. 65. P. 229. DOI: 10.1086/126606.
2. *Линник В. П.* О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды // Оптика и спектроскопия. 1957. № 4. С. 401.
3. *Hardy J. W.* Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. N. Y.: Oxford Univ. Press., 1998.
4. *Лукин В. П.* Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физ. наук. 2014. Т. 184, № 6. С. 599—640.
5. *Фрид Д. Л.* Гетеродинный прием оптического сигнала при атмосферных искажениях волнового фронта // ТИИЭР. 1967. Т. 55, № 1.
6. *Fried D. L.* Anisoplanatism in adaptive optics // J. Opt. Soc. Amer. 1982. Vol. 72, N 1. P. 52—62.
7. *Wang J. Y.* Phase-compensation optical beam propagation through atmospheric turbulence // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. P. 16.
8. *Rigaut F. J., Ellerbroek B. L., Flicker R.* Principles, limitations, and performance of multiconjugate adaptive optics // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems Technology. 2000. Vol. 4007. P. 1020—1031.
9. *Noil R. J.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Amer. 1976. Vol. 66, N 3. P. 207.
10. *Rigaut F., Neichel B.* Multiconjugate Adaptive Optics for Astronomy // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2020 [Электронный ресурс]: <<https://arxiv.org/abs/2003.03097>>.
11. *Neichel B., Rigaut F., Vidal F., van Dam M. A. et al.* Gemini multiconjugate adaptive optics system review // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. Vol. 440. P. 1002.

12. *d'Orgeville C., Diggs S., Fesquet V.* et al. Gemini South multiconjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems III. 2012. Vol. 8447. P. 84470X.
13. *Rigaut F.* Ground conjugate wide field adaptive optics for the ELTs // European Southern Observatory Conf. and Workshop Proc. 2002. Vol. 58. P. 11.
14. *Hart M., Milton N.M., Baranec C.* et al. A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide stars // Nature. 2010. Vol. 466. P. 727.
15. *Orban de Xivry G., Rabien S., Busoni L.* et al. First on-sky results with ARGOS at LBT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems. 2016. Vol. 9909. P. 990936.
16. *Wagner R., Helin T., Obereder A., Ramlau R.* An efficient Reconstruction Method for Ground Layer Adaptive Optics with mixed Natural and Laser Guide Stars. 2015 [Электронный ресурс]: <<https://www.ricam.oeaw.ac.at/files/reports/15/rep15-20.pdf>>.
17. *Guyon O., Yutaka Hayano, Motohide Tamura* et al. Adaptive optics at the Subaru telescope: current capabilities and development//Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems IV. 2014. Vol. 9148. P. 91481R.
18. *Vidal F., Gendron E., Rousset G.* Tomography approach for multi-object adaptive optics// JOSA A. 2010. Vol. 27. P. A253.
19. *Diolaiti E., Foppiani I., Conan J.-M.* et al. MAORY E-ELT multiconjugate adaptive optics module // 2nd Intern. Conf. on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, Canada. 2011. Vol. 24. P. 25—30.
20. *Lloyd-Hart M., Brusa G., Wildi F. P.* et al. Lessons learned from the first adaptive secondary mirror // Proc. of SPIE. Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications. 2003. Vol. 5169. P. 79—89.
21. *Fusco T., Sauvage J.-F., Petit C.* et al. Final performance and lesson-learned of SAXO, the VLT-SPHERE extreme AO: from early design to on-sky results //Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems IV. 2014. Vol. 9148. P. 91481U.
22. *Madec P.-Y., Arsenault R., Kuntschner H.* et al. Adaptive optics facility: from an amazing present to a brilliant future//Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI. 2018. Vol. 10703. P. 1070302.
23. *Hippler S.* Adaptive optics for Extremely Large Telescopes // J. of Astronomical Instrumentation. 2019. Vol. 08, N 02. P. 1950001.
24. *Wizinowich P.* Progress in laser guide star adaptive optics and lessons learned// Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems III. 2012. Vol. 8447. P. 84470D.
25. *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.
26. *Neichel B., Mouillet D., Gendron E.* et al. Overview of the European Extremely Large Telescope and its instrument suite// Soci'et'e Francaise d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A). 2018. Dec. P. 237—244.
27. *Ghez A.* Opening a New Window into the Universe//Nautilus. 2017 [Электронный ресурс]: <<https://sciencesprings.wordpress.com/2017/05/25/from-nautilus-opening-a-new-window-into-the-universe/>>.
28. *Redd T. N.* Extremely Large Telescope: The Biggest Eye on the Sky. 2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.space.com/40746-extremely-large-telescope.html>>.
29. *Tamai R., Koehler B., Cirasuolo M., Biancat-Marchet F.* et al. The ESO's ELT construction status // Proc. of SPIE. Ground-Based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 1070014.
30. *Stroebele S., Vernet E., Brinkmann M.* et al. Deformable mirrors development program at ESO // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems. 2016. Vol. 9909. P. 990908.
31. Dutch Company to Build Support structure for Extremely Large Telescope. DE INGENIERUM. 2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.deingenieur.nl/artikel/dutch-company-to-build-support-structure-for-extremely-large-telescope>>.
32. *Vernet E., Cirasuolo M., Cayrel M.* et al. ELT M4 — the largest adaptive mirror ever built // The Messenger. 2019. Vol. 178, Dec. P. 3, 4. DOI: 10.18727/0722-6691/5162.
33. *Biasi R., Manetti M., Andrichettoni M.* et al. E-ELT M4 adaptive unit final design and construction: a progress report // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 99097Y.
34. *Bonnet H., Biancat-Marchet F., Dimmler M.* et al. Adaptive optics at the ESO ELT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI. 2018. Vol. 10703. P. 1070310.

35. Ramsay S., Casali M., Cirauolo M. et al. Progress along the E-ELT instrumentation roadmap // Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. 2016. Vol. 9908. P. 990806.
36. Lombini M., Diolaiti E., Patti M. Historic evolution of the optical design of the Multi Conjugate Adaptive Optics Relay for the Extremely Large Telescope // MNRAS 000, 1–12. 2019 [Электронный ресурс]: <<https://arxiv.org/pdf/1903.07343.pdf>>.
37. Diolaiti E., Ciliegi P., Abicc R. et al. MAORY: adaptive optics module for the E-ELT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems. 2016. Vol. 9909. P. 99092D.
38. Davies R., Schubert J., Hartl M. et al. MICADO: first light imager for the E-ELT // Proc of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. 2016. Vol. 9908. P. 99081Z.
39. Davies H., Ageorges N., Barl L., Bedin R. MICADO: the E-ELT Adaptive Optics Imaging Camera [Электронный ресурс]: <https://www.researchgate.net/publication/50909541_MICADO_the_E-ELT_adaptive_optics_imaging_camera>.
40. Thatte N. A., Clarke F., Bryson I., Schnetler H. The E-ELT first light spectrograph HARMONI: capabilities and modes // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9908. P. 99081X-1.
41. Neichel B., Fusco T., Sauvage J.-F. et al. The adaptive optics modes for HARMONI: from classical to laser assisted tomographic AO // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 990909.
42. Bertram T., Absil O., Bizenberger P. et al. Single conjugate adaptive optics for METIS // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI. 2018. Vol. 10703. P. 10703014. DOI: 10.1117/12.2313325.
43. Sanders G., Gary H. The Thirty Meter Telescope (TMT): An International Observatory // J. of Astrophysics and Astronomy. 2013. Vol. 34, N 2. P. 81—86.
44. Liu F., Sanders G. Thirty Meter Telescope project status // Proc. of SPIE. Ground-Based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 1070013.
45. Ellerbroek B. A status report on the Thirty Meter Telescope adaptive optics program // J. of Astrophysics and Astronomy. 2013. Vol. 34. P. 121.
46. Herriot G., Hickson P., Ellerbroek B. et al. NFIRAOS: TMT narrow field near infrared facility adaptive optics // Proc. of SPIE. Advances in Adaptive Optics II. 2006. Vol. 6272. P. 62720Q.
47. Boyer C. Adaptive optics program at TMT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI. 2018. Vol. 10703. P. 107030Y.
48. Boyer C., Ellerbroek B. Adaptive optics program update at TMT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 990905.
49. Simard L., Ellerbroek B., Bhatia R. et al. Thirty Meter Telescope science instruments: a status report // Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. 2016. Vol. 9908. P. 99081V.
50. Crane J., Herriot G., Andersen D. et al. NFIRAOS adaptive optics for the Thirty Meter Telescope // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10703. P. 107033V.
51. Herriot G., Andersen D., Atwood J. et al. NFIRAOS — Multiconjugate AO System for TMT // 2nd Intern. Conf. on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes II. 2011.
52. Li M., Wei K., Tang J., Jiang C. et al. The progress of TMT laser guide star facility // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 99095Q.
53. Quirós-Pacheco F., Schwartz D., Kaushik D. et al. The Giant Magellan Telescope phasing strategy and performance // Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 107001N.
54. Bernstein R. A., McCarthy P. J., Raybould K., Bigelow B. Ch. An introduction to the GMT: Telescope & first generation instruments // Proc. of SPIE. Intern. Society for Optical Engineering. 2014. Vol. 9145. P. 91451C.
55. Fanson J., McCarthy P. J., Bernstein R. et al. Overview and status of the Giant Magellan Telescope project // Proc. of SPIE. Ground-Based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 1070012.
56. McLeod B., Catropa D., Durusky D. et al. The acquisition, guiding, and wavefront sensing system for the Giant Magellan Telescope // Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 107001T.

57. Conan R., van Dam M. A., Bouchez A. H. et al. Control algorithm and performance of the active optics system of the Giant Magellan Telescope // Proc. of SPIE. Ground-Based and Airborne Telescopes VII. 2018. Vol. 10700. P. 1070034.
58. Van Dam M. A., Bouchez A. H., Conan R. Novel tip-tilt sensing strategies for the laser tomography adaptive optics system of the GMT // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 990965.
59. Conan R., Bouchez A., Quiros-Pacheco F., McLeod B., Ashby D. The GMT active optics control strategies // Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V. 2016. Vol. 9909. P. 990911.
60. Quiros-Pacheco F., Conan R., Bouchez A., McLeod B. Performance of the Giant Magellan Telescope phasing system // Proc. of SPIE. Ground-Based and Airborne Telescopes VI. 2016. Vol. 9906. P. 99066D.

Сведения об авторах

- Виктор Владимирович Клеймёнов** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского; Военный институт (научно-исследовательский); гл. научный сотрудник; E-mail: vka@mail.ru
- Елена Владимировна Новикова** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского; Военный институт (научно-исследовательский); ст. научный сотрудник; E-mail: vka@mail.ru

Поступила в редакцию
01.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Клеймёнов В. В., Новикова Е. В. Экстремально большие наземные оптические телескопы // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 5—20.

EXTREMELY LARGE GROUND-BASED OPTICAL TELESCOPES

V. V. Kleymyonov, E. V. Novikova

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: vka@mail.ru

An overview of the current state of the design and construction processes of the three ground-based extremely large telescopes – the European Extremely Large Telescope (ELT), the Thirty Meter Telescope (TMT), and the Giant Magellan Telescope (GMT) – is presented. Operation of the telescopes is impossible without adaptive optics systems. Modern technologies for the use of adaptive optical systems to be included in the optoelectronic complexes of extremely large telescopes, are considered.

Keywords: extremely large telescopes, optical telescopes, ELT, TMT, GMT, aperture diameter, anisoplanatism, phase correction, adaptive optics, laser reference stars, multi-coupled AOS, surface layer AOS, multi-object AOS

REFERENCES

1. Babcock H.W. *The Astronomical Society of the Pacific*, 1953, no. 386(65), pp. 229. DOI:10.1086/126606.
2. Linnik V.P. *Optics and Spectroscopy*, 1957, no. 4, pp. 401. (in Russ.)
3. Hardy J.W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*, NY, Oxford Univ. Press, 1998.
4. Lukin V.P. *Phys. Usp.*, 2014, no. 57, pp. 556–592. DOI: 10.3367/UFNe.0184.201406b.0599.
5. Fried D.L. *Trudy Instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike*, 1967, no. 1(55). (in Russ.)
6. Fried D.L. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, no. 1(72), pp. 52–62.
7. Wang J.Y. *Appl. Opt.*, 1978, vol. 17, pp. 16.
8. Rigaut F.J., Ellerbroek B.L., Flicker R. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems Technology*, 2000, vol. 4007, pp. 1020–1031.
9. Noil R.J. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, no. 3(66), pp. 207.
10. Rigaut F., Neichel B. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2020, <https://arxiv.org/abs/2003.03097>.
11. Neichel B., Rigaut F., Vidal F., van Dam M.A. et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 440, pp. 1002
12. d'Orgeville C., Diggs S., Fesquet V. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems III*, 2012, vol. 8447, pp. 84470X.
13. Rigaut F. *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, 2002, vol. 58, pp. 11.
14. Hart M., Milton N.M., Baranec C. et al. *Nature*, 2010, vol. 466, pp. 727.
15. de Xivry O.G., Rabien S., Busoni L. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems*, 2016, vol. 9909, pp. 990936.

16. Wagner R., Helin T., Obereder A., Ramlau R. *An efficient Reconstruction Method for Ground Layer Adaptive Optics with mixed Natural and Laser Guide Stars*, 2015, <https://www.ricam.oeaw.ac.at/files/reports/15/rep15-20.pdf>.
17. Guyon O., Yutaka Hayano, Motohide Tamura et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems IV*, 2014, vol. 9148, pp. 91481R.
18. Vidal F., Gendron E., Rousset G. *JOSA A*, 2010, vol. 27, p. A253.
19. Diolaiti E., Foppiani I., Conan J.-M. et al. *Second International Conference on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, Canada*, 2011, vol. 24, pp. 25–30.
20. Lloyd-Hart M., Brusa G., Wildi F.P. et al. *Proc. of SPIE. Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications*, 2003, vol. 5169, pp. 79–89.
21. Fusco T., Sauvage J.-F., Petit C. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems IV*, 2014, vol. 9148, pp. 91481U.
22. Madec P.-Y., Arsenault R., Kuntschner H. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI*, 2018, vol. 10703, pp. 1070302.
23. Hippler S. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2019, no. 02(08), pp. 1950001.
24. Wizinowich P. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems III*, 2012, no. 8447, pp. 84470D.
25. Kleymyonov V.V., Novikova E.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 10(61), pp. 827–843.
26. Neichel B., Mouillet D., Gendron E. et al. *Soci'et'e Francaise d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A)*, 2018, Dec., pp. 237–244.
27. Ghez A. *Nautilus*, 2017, <https://sciencesprings.wordpress.com/2017/05/25/from-nautilus-opening-a-new-window-into-the-universe/>.
28. Redd T.N. *Extremely Large Telescope: The Biggest Eye on the Sky*, 2018, <https://www.space.com/40746-extremely-large-telescope.html>.
29. Tamai R., Koehler B., Cirasuolo M., *Biancat-Marchet F. et al. Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 1070014.
30. Stroebele S., Vernet E., Brinkmann M. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems*, 2016, vol. 9909, pp. 990908.
31. *Dutch Company to Build Support structure for Extremely Large Telescope. DE INGENIERUM*, 2018, <https://www.deingenieur.nl/artikel/dutch-company-to-build-support-structure-for-extremely-large-telescope>.
32. Vernet E., Cirasuolo M., Cayrel M. et al. *The Messenger*, 2019, vol. 178, December, pp. 3–4, DOI: 10.18727/0722-6691/5162.
33. Biasi R., Manetti M., Andrighettoni M. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 99097Y.
34. Bonnet H., Biancat-Marchet F., Dimmler M. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI*, 2018, vol. 10703, pp. 1070310.
35. Ramsay S., Casali M., Cirasuolo M. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, 2016, vol. 9908, pp. 990806.
36. <https://arxiv.org/pdf/1903.07343.pdf>.
37. Diolaiti E., Ciliegi P., Abicc R. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems*, 2016, vol. 9909, pp. 99092D.
38. Davies R., Schubert J., Hartl M. et al. *Proc of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, 2016, vol. 9908, pp. 99081Z.
39. Davies H., Ageorges N., Barl L., Bedin R. *MICADO: the E-ELT Adaptive Optics Imaging Camera*, https://www.researchgate.net/publication/50909541_MICADO_the_E-ELT_adaptive_optics_imaging_camera.
40. Thatte N.A., Clarke F., Bryson I., Schnetler H. *Proc. of SPIE*, 2016, vol. 9908, pp. 99081X-1.
41. Neichel B., Fusco T., Sauvage J.-F. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 990909.
42. Bertram T., Absil O., Bizenberger P. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI*, 2018, vol. 10703, pp. 10703014. DOI: 10.1117/12.2313325.
43. Sanders G., Gary H. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2013, no. 2(34), pp. 81–86.
44. Liu F., Sanders G. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 1070013.
45. Ellerbroek B. J. *Astrophys. Astr.*, 2013, vol. 34, pp. 121.
46. Herriot G., Hickson P., Ellerbroek B. et al. *Proc. of SPIE. Advances in Adaptive Optics II*, 2006, vol. 6272, pp. 62720Q.
47. Boyer C. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems VI*, 2018, vol. 10703, pp. 107030Y.
48. Boyer C., Ellerbroek B. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 990905.
49. Simard L., Ellerbroek B., Bhatia R. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, 2016, vol. 9908, pp. 99081V.
50. Crane J., Herriot G., Andersen D. et al. *Proc. of SPIE*, 2018, vol. 10703, pp. 107033V.
51. Herriot G., Andersen D., Atwood J. et al. *Second International Conference on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes II*, 2011.
52. Li M., Wei K., Tang J., Jiang C. et al. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 99095Q.
53. Quirós-Pacheco F., Schwartz D., Kaushik D. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 107001N.
54. Bernstein R.A., McCarthy P.J., Raybould K., Bigelow B.Ch. *Proc. of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 2014, vol. 9145, pp. 91451C.

55. Fanson J., McCarthy P.J., Bernstein R. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 1070012.
56. McLeod B., Catropa D., Durusky D. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 107001T.
57. Conan R., van Dam M. A., Bouchez A.H. et al. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 2018, vol. 10700, pp. 1070034.
58. Van Dam M.A., Bouchez A.H., Conan R. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 990965.
59. Conan R., Bouchez A., Quiros-Pacheco F., McLeod B., Ashby D. *Proc. of SPIE. Adaptive Optics Systems V*, 2016, vol. 9909, pp. 99091I.
60. Quirós-Pacheco F., Conan R., Bouchez A., McLeod B. *Proc. of SPIE. Ground-based and Airborne Telescopes VI*, 2016, vol. 9906, pp. 99066D.

Data on authors

- Victor V. Kleymyonov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Chief Scientist; E-mail: vka@mail.ru
- Elena V. Novikova** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Scientist; E-mail: vka@mail.ru

For citation: Kleymyonov V. V., Novikova E. V. Extremely large ground-based optical telescopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 1. P. 5—20 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-5-20