

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 520.24; 681.51

СОВРЕМЕННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ*

© А. А. Лубков, Ю. А. Попов

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: lubkov@iae.nsk.su*

Систематизированы и обобщены сведения об особенностях, режимах работы и технических характеристиках наземных солнечных телескопов мирового уровня в целях получения данных, необходимых для разработки и создания автоматизированной системы управления Крупным солнечным телескопом, входящим в состав Национального гелиогеофизического комплекса РАН.

Ключевые слова: автоматизированная система управления солнечным телескопом и обсерваторией, активная и адаптивная оптика, контроллер.

DOI: 10.15372/AUT20190114

Введение. В России проектируется перспективный Крупный солнечный телескоп (КСТ) нового поколения. Очевидно, что в нём должны быть использованы все лучшие технические достижения функционирующих и строящихся солнечных телескопов, современное оборудование для сбора и обработки данных, АСУ телескопом и обсерваторией.

Существующая информация по этим телескопам фрагментарна.

Задача предлагаемой работы — на основании информации, полученной из открытых источников и опыта авторов по созданию устройств управления телескопами предыдущего поколения: Автоматизированным солнечным телескопом (АСТ), Солнечным телескопом оперативных прогнозов (СТОП-1), Большим солнечным вакуумным телескопом (БСВТ) [1] — собрать воедино достижения существующих и проектируемых солнечных телескопов в целях предоставления данных, необходимых для создания и разработки АСУ КСТ.

Работа носит справочный характер, тем не менее в ней сформулированы базовые требования к автоматизированной системе, которая должна обеспечить: управление подсистемами телескопа и регистрирующей аппаратурой, сбор, архивирование, обработку и визуализацию наблюдательных данных, управление обсерваторией в целом, работу телескопа в режимах коллективного использования и удалённого доступа, а также приведены характеристики АСУ.

1. Пространственное разрешение солнечных телескопов наземного базирования. Солнце — не только основной фактор существования жизни на Земле, но и ближайшая к земной цивилизации полномасштабная космическая лаборатория процессов термоядерного синтеза, гидро- и газодинамики.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (государственная регистрация № АААА-А17-11706061006-6).

Дифракционный предел разрешения по Рэлею ограничивает минимально различимый телескопом угловой размер объекта, доступный для наблюдения с учётом явления дифракции света, и определяется в соответствии с формулой

$$\Delta l_{\min} = \Psi_{\min} F = 1,22 \frac{\lambda}{D} F \quad \text{или} \quad \Psi_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (1)$$

где Δl_{\min} — минимальный размер структуры на изображении Солнца, разрешаемый в фокальной плоскости телескопа; Ψ_{\min} — минимальный угол между элементами структуры на поверхности Солнца, разрешаемый телескопом; F и D — фокусное расстояние и диаметр отверстия объектива телескопа; λ — длина волны наблюдения.

Минимальный линейный размер структуры, различимый телескопом на Солнце, выражается формулой

$$\Delta L_{S_{\min}} = \Psi_{\min} \text{au} = \Psi_{\min} 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м},$$

где au — астрономическая единица — расстояние от Земли до Солнца (приблизительно 150 млн. км). Например, расчётный дифракционный предел для БСВТ ($D = 0,76$ м для длины волны 550 нм) Ψ_{\min} равен $8,8 \cdot 10^{-7}$ рад = $0,18''$, а минимальный наблюдаемый размер на Солнце $\Delta L_{S_{\min}}$ для этой длины волны равен 130 км.

Для космического телескопа Хаббл ($D = 2,46$ м для длины волны 550 нм) расчётное значение Ψ_{\min} равно $2,8 \cdot 10^{-7}$ рад = $0,06''$, а $\Delta L_{S_{\min}}$ — 42 км. Реальное угловое разрешение телескопа Хаббл оказалось ниже расчётного и близко к $0,09''$ [2], соответственно $\Delta L_{S_{\min}}$ составляет около 70 км.

Для телескопов наземного базирования из-за неоднородностей земной атмосферы минимальные искажения наблюдаемых волновых фронтов света только при очень благоприятных климатических условиях бывают меньше $0,5''$, тогда $\Delta L_{S_{\min}}$ увеличивается до значений 360–400 км.

В БСВТ и других вакуумных телескопах, которые активно развивались в 1970–90-е гг., приземный слой атмосферы преодолевается в вакууме, что частично уменьшает атмосферные искажения, но при этом требуется высокое качества изготовления верхнего окна иллюминатора, так как необходимо обеспечить его оптическую однородность и механическую прочность. При диаметрах вакуумной трубы более 1 м такой иллюминатор изготовить проблематично.

Ограничение пространственного разрешения земных солнечных телескопов при увеличении их апертуры из-за атмосферных искажений волновых фронтов наглядно проявилось при эксплуатации Солнечного телескопа Мак-Мат Пирса (McMath-Pierce Solar Telescope) [3] в Kitt Peak National Observatory (KPNO) (штат Аризона). Он был построен в 1962 году и до 2009 года оставался самым большим солнечным телескопом в мире. Диаметр гелиостатного зеркала равен 1,6 м, проектное пространственное разрешение телескопа — $0,07''$, которого, однако, из-за атмосферных искажений волновых фронтов достичь не удалось. В 2002 году телескоп был оборудован адаптивной оптикой, после чего его разрешающая способность существенно приблизилась к дифракционному пределу [4].

Адаптивная оптика — метод, основанный на использовании деформируемых зеркал сложной конструкции, управляемых компьютером, которые могут скорректировать искажения, вносимые турбулентностью атмосферы в реальном времени.

В результате получаем изображения почти той же чёткости, как при наблюдениях из космоса. Адаптивная оптика позволяет, таким образом, получать более детальные изображения малоразмерных объектов в сравнении с обычными телескопами.

1.1. *Перспективные солнечные телескопы (обзор)*. Из вышеизложенного следует, что без адаптивной оптики, обеспечивающей устранение влияния неоднородностей земной ат-

мосферы, проектирование и строительство наземных солнечных телескопов с апертурой больше 1 м нецелесообразны.

Рассматриваемые телескопы предназначены для достижения пространственного разрешения элементов солнечной структуры на уровне их дифракционных пределов. Планируемое угловое разрешение телескопов $0,03''$ – $0,1''$ позволит различать мелкомасштабные структуры на Солнце размером 25–80 км при $\lambda = 500$ нм. Это невозможно обеспечить без коррекции искажений волнового фронта изображений гелиосферы и хромосферы, происходящих в атмосфере земли. Адаптивная оптика (АО) телескопов предназначена для коррекции быстрых изменений параметров атмосферы (частота до 2 кГц), а активная оптика (аО) — для коррекции медленных (гравитационных и тепловых) изменений формы первичного и вторичного зеркал (частота до 50 Гц).

Телескопы обеспечивают проведение наблюдений и регистрацию результатов частот в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В состав регистрирующей аппаратуры телескопов входят спектрополяриметры, в том числе работающие в диапазоне 2300–5000 нм с криогенным охлаждением, фильтрографы для получения изображений с узкой и широкой полосами, дифракционные спектрографы, тепловизоры.

Телескопы имеют перестраиваемую под конкретное наблюдение оптическую схему, которая может оперативно изменяться как в процессе подготовки эксперимента, так и в процессе наблюдения. Для достижения уникальных характеристик телескопов должны быть обеспечены стабильные условия наблюдения, устранены градиенты температуры, вибрации, скомпенсированы гравитационные и ветровые деформации.

Успешные технические решения, обеспечивающие достижение дифракционного предела, были найдены при создании телескопов наземного базирования GST — Goode Solar Telescope (ранее назывался NST — New Solar Telescope) и GREGOR.

Телескоп GST [5] был назван новым благодаря реализованным передовым техническим решениям. Во-первых, в оптический тракт телескопа было введено устройство адаптивной оптики, которое, используя деформируемое зеркало и датчик волнового фронта Шака — Гартмана, дало возможность корректировать атмосферные искажения светового фронта. Применена активная оптика, позволяющая корректировать механические (весовые, ветровые) и температурные деформации первичного зеркала. Использована активная вентиляция устройств оптического тракта телескопа и купола с поддержанием минимальных градиентов температур. Во-вторых, телескоп позволяет проводить исследования в широком диапазоне длин волн (от 390 до 1600 нм — видимый свет и ближний ИК-диапазон). В-третьих, использованы компьютеризованные системы управления телескопом и его подсистемами, работающие в реальном масштабе времени. Расчётный дифракционный предел разрешения GST для длины волны 550 нм равен $0,07''$, и он практически достигнут. Это подтверждено результатами наблюдений процессов в фотосфере и хромосфере Солнца [6].

Телескоп GREGOR [7] создан консорциумом европейских организаций, возглавляемым Институтом физики Солнца Кипенхойера (Германия). Оптический тракт телескопа оборудован системами принудительного выравнивания температуры зеркал с температурой окружающей среды. Коррекция атмосферных искажений волновых фронтов осуществляется деформируемыми зеркалами. Согласно расчётам специалистов, подтверждённым результатами исследований [7, 8], телескоп способен регистрировать структуры на поверхности Солнца с линейными размерами до 60 км, что эквивалентно пространственному разрешению $0,08''$. Это позволяет наблюдать солнечную грануляцию и получать данные о её формировании. С помощью телескопа GREGOR впервые в солнечных пятнах получены фрагменты изображения менее 100 км, что расширило понимание процессов магнито-конвекции. Отличная поляриметрическая чувствительность даёт возможность измерять напряжённость магнитного поля до нескольких гаусс, в результате впервые показано, что даже в самых спокойных районах Солнца 80 % площади покрыто магнитными полями.

Характеристики современных солнечных телескопов

Характеристика	GST — Goode Solar Telescope (ранее назывался NST)	GREGOR	DKIST — the Daniel K. Inouye Solar Telescope (ранее назывался ATST)	NLST — National Large Solar Telescope	КСТ — крупный солнечный телескоп (LST-3)	EST — the European Solar Telescope
Обсерватория, год ввода телескопа в эксплуатацию	The Big Bear Solar Observatory (BBSO), штат Калифорния, США, 2009	Обсерватория Тейде (остров Teneriffe, Канарские острова), Испания, 2012	Обсерватория Халеакала (Haleakala Observatory, остров Мауи, Гавайи), США, 2019 (план)	Расположен около села Мерак, провинция Лолакх, штат Джамму и Кашмир, Индия, 2022 (план)	Связанная солнечная обсерватория (пос. Монды, Бурятия), РФ, 2025 (план)	Обсерватории Роке-де-лос-Мучачос на острове Ла Пальма или Тейде на острове Teneriffe, Канарские острова, Испания, 2026 (план)
Высота расположения, м	2000	2390	3000	4486	2000	2390 (о. Тейде), 2396 (о. Ла Пальма)
Апертура первичного зеркала, м	1,6	1,5 (есть центральное отверстие)	4,0	2,0	3,0	4,1 (есть центральное отверстие 1,4)
Схема телескопа, монтажная	Грегорианская, экваториальная	Грегорианская, альт-азимутальная	Грегорианская, альт-азимутальная	Грегорианская, альт-азимутальная	Грегорианская, альт-азимутальная	Грегорианская, альт-азимутальная
Расположение зеркала M2	Внеосевое	Осевое	Внеосевое	Осевое	Осевое	Осевое
Угловое разрешение	Дифракционный предел 0,065" при $\lambda = 500$ нм и 0,21" при $\lambda = 1600$ нм	< 0,1" при $\lambda = 500$ нм, пространственное разрешение на Солнце 70 км	Дифракционный предел 0,03" при $\lambda = 500$ нм, цель: пространственное разрешение на Солнце 25 км	< 0,1" при $\lambda = 500$ нм, пространственное разрешение на Солнце 70 км	< 0,1" при $\lambda = 500$ нм	Дифракционный предел 0,04", цель: 0,03" при $\lambda = 500$ нм, пространственное разрешение на Солнце 30 км
Куле-рогатор*	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть
Диапазон длины волн наблюдения, нм	390–1700	350–2000	380–5000	380–2500	380–2300	390–2300 цель: 350–2300

* Рогатор в куле-фокусе

Продолжение

Характеристика	GST	GREGOR	DKIST	NLST	KCT	EST
Активная оптика (АО) и адаптивная оптика (АО) зеркала M1, M2	Зеркало M1 имеет 36 осевых и 6 боковых точек поддержки. Три осевые и три боковые предназначены для фиксации его позиции, остальные 33 осевые точки обеспечивают коррекцию геометрии M1, а три боковые — малые повороты зеркала. Обеспечено поддержание температуры зеркала, равной температуре окружающей среды (с погрешностью $\pm 0,3$ °C). Зеркало M2 смонтировано на гексапode M-850 (Physik Instrumente, Germany) [9].	Обеспечено поддержание температуры зеркала M1, равной температуре окружающей среды (с погрешностью $\pm 0,5$ °C) [10]. Конструкция крепления зеркала M1, M2 и M3 жёсткая, что позволяет работать при скоростях ветра до 15 м/с. Зеркало M1 изготовлено из Zerodur, M2 и M3 изготовлены с использованием углеродной волоконной керамики, армированной карбидом кремния Csic_R [11]. Зеркало M2 смонтировано на гексапode, имеющем шесть степеней свободы и управляемом датчиком волнового фронта.	Зеркало M1 имеет 120 (118) осевых и 24 боковых привода (разработка AMOS, Бельгия). Гидравлические части приводов обеспечивают постоянную оптическую форму поверхности зеркала, компенсируя гравитационные и тепловые деформации (АО), а их пневматические части — низкочастотную компенсацию волнового фронта (АО) [12]. Зеркало M2 расположено на гексапode и снабжено механизмом быстрых наклонов (tip-tilt) [13]. Гексапode используется для юстировки положения первого фокуса телескопа (АО), а tip-tilt — для компенсации высокочастотных вибраций телескопа и фазовых сдвигов волнового фронта в атмосфере земли (АО).	Зеркало M1 имеет пассивные поддержки: осевую (3 внутренних и 12 внешних противосев) и боковую (12 внешних). Осевая поддержка обеспечивает фокусировку и качание M1 по осям X, Y, боковая — перемещение по X, Y и вращение [14, р. 239]. Зеркало M2 установлено на гексапode. Его положение определяется с помощью датчика волнового фронта АО, контролируется по точечному источнику, расположенному в фокусе F1 либо по математической модели [14, р. 202].	Зеркало M1 имеет толщину 120 мм и имеет 84 толкателя осевой разгрузки и 24 — торцевой [15]. Зеркало M2 размером 420 мм устанавливается на гексапode для согласования с зеркалом M1 и имеет систему tip-tilt для компенсации гравитационных и термических смещений.	Зеркало M1 имеет 96 осевых исполнительных поршней, которые задают его форму, компенсируя гравитационные, тепловые и ветровые деформации, и 30 боковых гидравлических пассивных приводов [16]. Зеркало M2 расположено на гексапode с механизмом наклонов tip-tilt с тремя пьезоприводами, диапазоны перемещения составляют 180 мкм, что эквивалентно наклону $\pm 60''$. Гексапode используется для юстировки положения первого фокуса (АО), tip-tilt корректирует волновой фронт (АО) для приборов фокуса Несмита, например для компенсации колебаний ветровой нагрузки с частотами менее 150 Гц.

Продолжение

Характеристика	GST	GREGOR	DKIST	NLST	KCT	EST
Адаптивная оптика (АО)	Адаптивная оптика уменьшает погрешности, вызванные атмосферой. Имеются зеркало, снабжённое механизмом быстрых наклонов tip-tilt фирмы Xinetics, и деформируемое зеркало, обеспечивающее частоту переключений до 4 кГц. Система АО-308 имеет датчик Шака — Гартмана (видеокамера Phantom V7.3 с разрешением 800 × 600 пикселей (используются 416 × 400 пикселей) и деформируемое зеркало с 357 актюаторами и 308 субапертурами (до 20 по апертуре), частота переключений 2,3 кГц [17]; t_0 превышает 7 см.	Датчик волнового фронта имеет 156 субапертур. Деформируемое зеркало DM0 имеет 256 актюаторов, обеспечивающих 170 режимов коррекции с частотой управления до 2 кГц. Полоса пропускания системы управления в замкнутом контуре 120 Гц [18].	Зеркало M5 снабжено механизмом быстрых наклонов tip-tilt. Зеркало M9 (M10) фирмы AOA Xinetics [19], Northrop Grumman Corporation (NYSE: NOC) деформируемое, количество актюаторов 1600, среднеквадратичное отклонение формы поверхности от заданной 4 нм [20]. Для управления наклонами зеркала M5 и формой M9 используются датчик Шака — Гартмана и контроллер Bittware SS—PCJe—DS, обеспечивающие контроль и коррекцию искажений волнового фронта [21]. Разрешение видеокамеры датчика 960 × 960 пикселей, размер субапертуры ячейки лэнзлета 20 × 20 пикселей, частота коррекции формы зеркала 1975 Гц. Планируемые характеристики: при $t_0 = 7$ см и $\lambda = 500$ нм число Штреля составляет 0,3; при $t_0 = 20$ см и $\lambda = 630$ нм число Штреля — 0,6; максимальная задержка в тракте управления 620 мкс [21, p. 12].	Деформируемое зеркало M5 имеет 496 актюаторов (26 по апертуре), которые в центральной затенённой «пауком» области, отсутствуют. Местоположение M5 относительно фокуса F3 сопряжено с высотой 30 метров над уровнем М1 телескопа. Зеркало M6 снабжено механизмом быстрых наклонов tip-tilt. Разрешение видеокамеры датчика волнового фронта 660 × 660 пикселей, размер субапертуры 24 × 24 пикселя, частота смены кадров 3000 Гц, скорость передачи ~10,4 Гбит/с. Соотношение Штреля >0,5 [14, p. 250].	Используется адаптивная оптическая система высокого порядка [22]. Углы наклона tip-tilt зеркала 0,04–30'', частота работы зеркала 200 Гц (цель: 1 кГц). Количество субапертур в датчике Шака — Гартмана 3600 (60 × 60 пикселей) [23, с. 167–171].	Адаптивная оптика приземного слоя (Ground Layer Adaptive Optics) состоит из зеркала M6 (имеет меньшую, чем M2, инерционность), которое снабжено механизмом быстрых наклонов tip-tilt, деформируемого зеркала M7 (AOA SPAS или Xinetics) с 1852 апертурами, для управления которыми нужно 2150 пьезоэлектрических актюаторов (51 по диаметру изображения, в затенённой центральной части зеркала актюаторы отсутствуют) [24]. Разрешение датчика Шака — Гартмана для управления зеркалами GLAO должно быть не менее 1200 × 1200 элементов, быстроедействие >2 кГц [16]. Предполагается иметь в составе EST датчик с разрешением 2300 × 2300 пикселей.

Окончание

Характеристика	GST	GREGOR	DKIST	NLST	KCT	EST
Мульти-сопряжённая оптика (МСАО)	МСАО у GST отсутствует. Однако в BBSO работают над её созданием в целях расширения корректируемого FOV для телескопа DKIST.	МСАО создана уже после ввода телескопа в эксплуатацию. К имеющемуся ранее деформируемому зеркалу DM0 добавлены DM1 и DM2, сопряжённые с высотами 25 и 8 км соответственно [18].	Включает несколько (до 6) гибких зеркал, три из них корректируют искажения волнового фронта, вызванные флотуацией атмосферы на поверхности с этим сопряжённой с этим зеркалом высоте (16; 7; 4,4 км). Обсуждается проект создания датчика Шака — Гармана [25] с разрешением $10^4 \times 10^4$ и частотой кадров 2 кГц [21].	Информация о МСАО неизвестна.	Для коррекции оптических неоднородностей на высотах 3, 10, 12 и 16 км над уровнем моря разрабатывается независимый модуль МСАО, который может быть установлен в оптический тракт телескопа.	Назначение МСАО — получение корректного изображения в поле зрения $1' \times 1' \text{ с}$ числом Пштреля не менее 0,7 ($\lambda = 0,39 - 2,3 \text{ мкм}$). МСАО включает гибкие зеркала M9–M12, каждое из которых корректирует искажения волнового фронта на сопряжённой с этим зеркалом высоте 25, 13, 3, 1 км. Число актюаторов по диаметру луча равно 32, 18, 14, 34 соответственно.
Тепловая диафрагма и поле зрения приборов (FOV) в куде-фокусе	FOV = 180'' [9]; корректируемое устройством АО-308, FOV = 85'' [17]. Поле зрения тепловой диафрагмы 120'' (убирает ~2,5 кВт).	FOV тепловой диафрагмы, расположенной в первичном фокусе, 150'', максимальное — 300'' [10]. Неиспользованный свет отражается за пределы телескопа.	FOV тепловой диафрагмы, расположенной в первичном фокусе и охлаждаемой водой, 300'', поле зрения в куде-фокусе оптической лаборатории 180'' [13].	Диаметр изображения Солнца в первичном фокусе 33 мм, отверстия в охлаждаемой тепловой диафрагме 3,4 мм, FOV $\approx 200''$ [26]. Неиспользованный свет отражается за пределы телескопа.	FOV тепловой диафрагмы, расположенной в первичном фокусе, не менее 120'' [23]. Диафрагма убирает 6,1 кВт (тепло, отражённое от M1)	FOV тепловой диафрагмы, расположенной в первичном фокусе, 120'', поле зрения в куде-фокусе оптической лаборатории не менее 60'' для λ от 0,39 до 2,3 мкм. Диафрагма убирает 13,4 кВт, или 95 % тепла, отражённого от M1.

Телескоп обеспечивает наблюдение Солнца как в видимой, так и в ближней инфракрасной областях длин волн, что позволяет получать новые данные о строении фотосферы и вышележащей хромосферы.

Результаты наблюдений, полученные с помощью GST и GREGOR, наглядно продемонстрировали возможности наземных телескопов и послужили основанием для проектирования и строительства солнечных телескопов с диаметром главного зеркала 2–4 метра.

В таблице и разд. 1.2 приведены характеристики шести лучших наземных солнечных телескопов, в том числе строящихся и проектируемых.

1.2. Научные инструменты оптической лаборатории, расположенной в куде-фокусе.

1.2.1. Характеристики научного оборудования GST.

FISS (Fast Imaging Solar Spectrograph) — быстродействующий солнечный спектрограф-визуализатор. Одновременно записывает полосы $H\alpha$ на длине волны $\lambda = 656,3$ нм и $Ca II$ $\lambda = 854,2$ нм. Спектрограф — полностью зеркальная система с решёткой Эшеле с разрешением $R = 150000$ в ближней инфракрасной области и $R = 220000$ в фиолетовой. Разрешение объектов лучше $1,0''$. Время экспозиции кадра 30 мс, а шага сканирования 110 мс [27].

NIRIS (Second Generation Near-Infrared Imaging Spectropolarimeter) — спектрополяриметр-фильтрограф ближнего инфракрасного диапазона второго поколения. Полоса пропускания фильтров 0,8–1,5 нм, а двух перестраиваемых эталонов Фабри-Перо (FP) ~ 10 пм. Рабочий диапазон 1000–1700 нм, поляриметрическая чувствительность равна 10^{-4} [28].

Filtergraph — узкополосный фильтрограф (в фокусе Несмита) имеет фильтры с полосой пропускания от 0,025 до 1,0 нм и CCD-камеру. Рабочий диапазон 430,5–2200 нм, дифракционное разрешение $0,111''$ при $\lambda = 705,7$ нм. Низкочастотные искажения корректируются устройством наклонов (tip/tilt), управляемым корреляционным трекером [29].

1.2.2. Характеристики научного оборудования GREGOR.

GFPI (GREGOR Fabry-Pérot Interferometer) — интерферометр Фабри-Перо. Спектральное разрешение $R = 250000$. Время сканирования линии — минуты. Диапазон пропускания FP равен 530–860 нм, поляриметра — 580–660 нм [30].

BIC (Blue Imaging Channel) — канал визуализации голубой. Вместе с GFPI и с помощью интерференционных фильтров для линий $Ca II H$ с $\lambda = 396,8$ нм, G-диапазона с $\lambda = 430,7$ нм и с $\lambda = 450,8$ нм обеспечивает формирование до 8 кадров в секунду.

HiFI (High-Resolution Fast Imager) — быстрый визуализатор высокого разрешения, использует sCMOS-камеру LaVision, время записи кадра составляет несколько мс (частота ~ 50 Гц), пространственное разрешение $0,025''/\text{пиксель}$ (20 км на Солнце).

GRIS (GREGOR Infrared Spectrograph) — инфракрасный спектрограф. Диапазон 1000–2300 нм, рабочие линии $He I$ с $\lambda = 1083$ нм и $Fe I$ с $\lambda = 1565$ нм, $R \sim 200000$ – 300000 [10]. Масштаб углового разрешения $0,13''/\text{пиксель}$. Используется совместно с TIP-2 (Tenerife Infrared Polarimeter) — инфракрасным поляриметром, диапазон 1000–1800 нм, поле зрения $70'' \times 70''$, время сканирования поля для получения вектора Стокса 20 мин [31].

VBI (Broad-Band Imager) — широкополосный визуализатор. Длины волн: $\lambda = 397$; 430; 486; 656; 709; 777 нм, поле зрения $102'' \times 68''$.

ZIMPOL-3 (Zurich Imaging Polarimeter) — тепловизор-поляриметр с разрешением 10^{-5} .

1.2.3. Характеристики научного оборудования DKIST [32].

Широкополосный фильтрограф (визуализатор изображений) видимого диапазона VBI (Visible Broad-band Imager) [33] с высоким пространственным разрешением 393,3–486,4 нм (голубой канал с разрешением $0,022''$), 656,3–705,8 нм (красный канал с разрешением

0,034"). Полоса пропускания каналов может быть сужена за счёт установки узкополосных фильтров. Время получения необработанных данных 0,033 с, время реконструкции изображения 3,2 с.

Спектрополяриметр видимого диапазона ViSP (Visible Spectropolarimeter) — это щелевой спектрограф для измерения полного состояния поляризации одновременно в трех выбранных линиях спектра в диапазоне длин волн 380–900 нм. Высокое пространственное разрешение 3,5 пм, $R > 180000$ при $\lambda = 630$ нм. Время получения результата < 10 с.

Перестраиваемый фильтр видимого диапазона 520–870 нм VTF (Visible Tunable Filter) [34] — прибор на основе эталона Фабри-Перо для получения узкополосных (диапазон ~ 1 нм) изображений с высоким пространственным (5–10 пм) и временным разрешением (одно измерение ~ 34 мс), обеспечивающий скоростную спектрометрию, поляриметрию и поверхностную фотометрию.

Спектрополяриметр ближнего инфракрасного диапазона полного поля [35] обеспечивает разрешение на уровне дифракционного предела DL-NIRSP (Diffraction-Limited Near-Infrared Spectropolarimeter), спектральный диапазон 500–1800 нм. Прибор базируется на дифракционной решётке и волоконной оптике, обеспечивает высокое пространственное разрешение (0,03" при $\lambda = 900$ нм и размере поля $2,4" \times 1,8"$), спектральное разрешение ($R \approx 125000$) и поляриметрическую точность $5 \cdot 10^{-4}$, одиночное измерение ~ 34 мс. Этот прибор позволяет проводить наблюдения солнечного диска, лимба и его окрестностей (т. е. фотосферы, хромосферы и коронарной плазмы).

Спектрополяриметр криогенный ближнего инфракрасного диапазона Cryo-NIRSP (Cryogenic Near-Infrared Spectropolarimeter) [36] имеет спектральный диапазон 1000–5000 нм. Он предназначен для измерения поляризации спектральных линий в областях, прилегающих к лимбу, в короне (в пределах 1,5 радиуса Солнца) и на диске (с $\lambda \sim 4651$ нм); одноцелевой, с блоком контекстного выбора ориентаций поля наблюдения и щели. Пространственное разрешение $1,0" - 0,15"$ (для разных длин волн). Спектральное разрешение $R \approx 30000$ для щели $0,5"$ и $R \approx 100000$ для щели $0,15"$. Частота кадров поляризационного измерения до 10 Гц. В каждый момент времени можно наблюдать только одну спектральную линию, время перестройки на другую равно 70 с.

1.2.4. Характеристики научного оборудования NLST.

Visible wavelength broad band imager — широкополосный фильтрограф видимого диапазона двухканальный (синяя и красная области). Требуемая длина волны выделяется узкополосным фильтром шириной 0,25–1,0 нм. Предназначен для изучения атмосферы на разных глубинах: в линиях Ca II K с $\lambda = 393,4$ нм — низкая хромосфера, CN-диапазон с $\lambda = 383,3$ — фотосфера, G-диапазон с $\lambda = 430,5$ и 660 нм — фотосфера и H α с $\lambda = 656,3$ нм — хромосфера, магнитных характеристик атмосферы, а также получения кинофильмов.

Tunable Fabry-Perot narrow band imager — узкополосный фильтрограф на основе фильтра с полосой пропускания 0,3 нм и двух перестраиваемых эталонов Фабри-Перо. Диапазон 500–900 нм; спектральное разрешение > 200000 при $\lambda = 600$ нм (~ 40 точек на профиль спектральной линии обеспечивают спектрополяриметрию), время получения кадра 0,2 с.

Спектрополяриметр видимого и инфракрасного диапазонов 380–1600 нм, спектральное разрешение > 200000 (3 пм при $\lambda = 600$ нм), поляризационная точность 10^{-4} [14, с. 82–99].

1.2.5. Характеристики научного оборудования KCT.

Несколько узкополосных перестраиваемых фильтрографов, спектрографов и спектрополяриметров для различных диапазонов длин волн, включая инфракрасный [23]: дифракционный спектрограф с модулем интегрального поля, компактный спектрограф-спектрополяриметр, узкополосный фильтрограф на основе эталонов Фабри-Перо, фильтрограф широкополосный, спектрограф Литтрова (расположен в фокусе Несмита) [23, с. 168].

1.2.6. Характеристики научного оборудования EST.

ВВ (visible Broad Band imager) — широкополосный фильтрограф с тремя каналами формирования видимых, в том числе тепловизорных изображений, в диапазонах 380–500 и 600–900 нм.

NB (Narrow Band) tunable filter spectropolarimeter или Narrow Band imager — узкополосный перестраиваемый спектрополяриметр или узкополосный тепловизор, пять каналов спектрополяриметров с узким и перестраиваемым диапазонами: три в диапазоне видимых длин волн 390–500, 500–620, 620–860 нм и два в ближнем инфракрасном (NIR) 800–1100, 1500–1800 нм. Четыре решётчатых спектрографа: два для видимого спектрального диапазона 390–560, 560–1100 нм и два для NIR 700–1600, 1000–2300 нм. Спектрографы универсальные могут работать в разных конфигурациях, используя дополнительные модули.

LsSS (Long-slit Standard Spectrograph) — дифракционный спектрограф с высокой цельюю.

IFU-MSMWSP (Multi-Slit Multi Wavelength Spectrograph equipped with an integral Field Unit) — многоцелевой многоволновый спектрограф с интегрированным блоком полного поля.

TUNIS (Tunable Universal Narrow band Imaging Spectrograph) — настраиваемый универсальный узкополосный спектрограф изображений.

MSDP-NG (Multichannel Subtractive Double Pass, New Generation) — многоканальный субтрактивный спектрограф с двойным проходом [16, с. 76].

2. Автоматизированные системы управления перспективными солнечными телескопами наземного базирования включают четыре основные системы управления: обсерваторией OCS (Observatory Control System), телескопом TCS (Telescope Control System), инструментами ICS (Instrument Control System), сбором и обработкой данных DHS (Data Handling System) [16, 37].

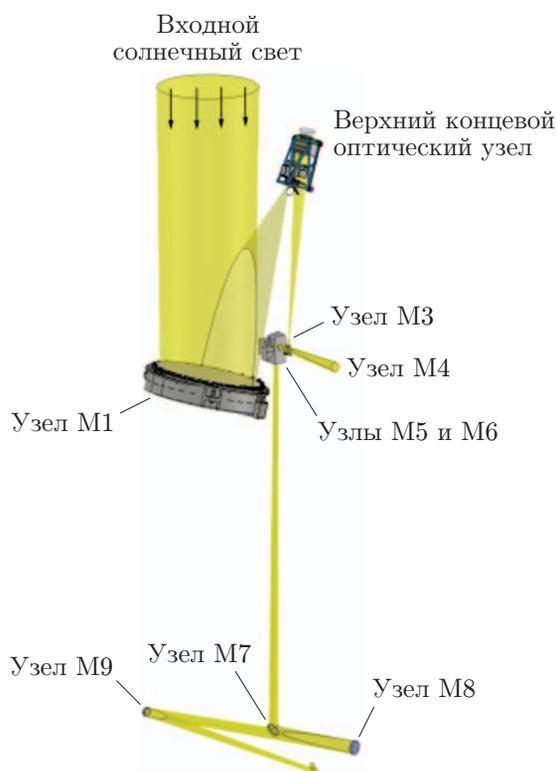
2.1. Система TCS предназначена для управления подсистемами и устройствами телескопа, обеспечивающими позиционирование телескопа в заданные координаты, слежение за объектом наблюдения или сканирование области Солнца, а также качество получаемых данных (изображений).

Система TCS обеспечивает управление монтировкой, зеркалами, устройствами передающей (питающей) оптики, подсистемами активной, адаптивной и мультисопряжённой оптики, устройствами теплового ограничения (останова), устройствами, перемещающимися в процессе наблюдения (например, вводом или выводом из оптического тракта телескопа модуля искусственной луны, спектрополяриметра из оптического тракта спектрографа); управление деротатором изображения, платформой в куде-фокусе, куполом, подсистемами стабилизации температуры телескопа и подкупольного пространства, фильтрации воздуха от пыли и т. д.

Система TCS имеет иерархическую структуру.

Верхний уровень предназначен для диспетчерского управления. Он состоит из серверов баз данных и пользовательских компьютеров, которые обеспечивают человеко-машинный интерфейс (HMI) для наблюдателей и персонала обсерватории, доступ к телескопу, контроль и мониторинг процесса экспериментов. Серверы и компьютеры этого уровня связаны друг с другом и с процессорными устройствами среднего уровня локальными сетями LAN (Local Area Networks), чаще всего это каналы Ethernet (волоконно-оптические или проводные). Сети должны включать два основных сегмента, которые предназначены для передачи команд управления и данных.

Средний уровень — программируемые логические и другие контроллеры (PLC, VME, PXI и т. д.), которые обеспечивают управление устройствами нижнего уровня.



Оптическая схема телескопа DKIST

Нижний уровень обеспечивает управление оборудованием. Он содержит датчики, исполнительные механизмы, приводы, актюаторы, переключатели, контакторы, видеокamеры, другие устройства и полевую шину (CAN, Profibus, WorldFIP и т. д.), связывающую контроллеры с устройствами нижнего уровня. Для некритичных по времени применений может использоваться сеть Ethernet, а для связи в реальном времени — EtherCAT или Profinet. Использование волоконно-оптических интерфейсов (например, SCI, Fibre Channel) должно обеспечить большую пропускную способность и защиту от возможных источников электромагнитных помех.

Рассмотрим телескоп DKIST (рисунок) [38, 39], в состав TCS которого входят:

1. Монтажная система телескопа включает конструкцию и механические узлы, контроллеры, приводы, используемые для указания, слежения за положением и вращения оптики и регистрирующих приборов в процессе проведения исследований. В её составе находятся монтаж телескопа, лаборатория в куде-фокусе и др.

2. Система первичного зеркала M1 поддерживает постоянную оптическую форму, компенсируя деформации, зависящие от его положения и температурных градиентов.

3. Верхняя концевая оптическая система (расположена на верхушке телескопа) включает тепловую диафрагму для поглощения солнечного света, не попадающего в поле зрения телескопа; вторичное зеркало M2 с устройствами компенсации его гравитационных и тепловых деформаций, а также фазовых сдвигов волнового фронта в атмосфере земли; устанавливаемый модуль искусственной луны (для работы телескопа в режиме коронографа); датчики, приводы и контроллеры.

4. Питающая оптика предназначена для передачи изображения области солнца (неба) выбранной зеркалами M1 и M2 на регистрирующую аппаратуру и датчики волнового фронта адаптивной и активной оптики. Питающая оптика подразделена на передающую оптику (M3–M6) и оптику куде-платформы (M7–M9).

Адаптивная оптика в куде-фокусе содержит оптику высокого порядка (АО-С) и низкого порядка (аО-С). В АО-С входят [21] зеркало М5, снабжённое высокочастотной системой наклона и поворота (tip-tilt), и деформируемое зеркало М9 (или М10) фирмы Xinetics [19]; датчик Шака — Гартмана; контроллер для расчёта наклонов М5 и деформаций М9.

Адаптивная оптика низкого порядка (аО-С) предназначена для вычисления информации о волновом фронте в восьми внеосевых точках поля, которая используется для поддержания квазистатической оптической юстировки телескопа, а также при неработающей АО-С для коррекции формы М1.

Для коррекции волнового фронта используется и мультисопряжённая адаптивная оптика (МСАО) (см. таблицу).

Температурные режимы зеркал обеспечиваются их охлаждением.

5. Система регулировки и калибровки служит для запуска, отладки и юстировки TCS.

6. Система захвата цели обеспечивает формирование изображения полного диска солнца, которое является базовым для системы гидирования и может использоваться для выбора желаемой зоны наблюдения. Это изображение формируется телескопом D-score 60 и камерой CCD PixelFly. Полученные изображения полного диска сохраняются в базе метаданных DKIST.

7. Купол и его оборудование предназначены для защиты телескопа. Подвижные части: азимутальные и шторные тележки, контроллеры, двигатели, приводы, кабельное оборудование — используются для задания исходного положения и последующих перемещений, синхронных и согласованных с движениями телескопа во время научных наблюдений. Оборудование купола включает облицовку, подсистемы вентиляции, магистрали подачи охлаждающей жидкости, осветительные и распределительные устройства, грозозащиту и т. п.

2.1.1. В состав оборудования телескопа входят метеостанция, которая обеспечивает контроль погодных условий, требуемых для каждого планируемого наблюдения; высокопроизводительное сетевое оборудование, необходимое для получения экспериментальных (архивных) данных и работы удалённых наблюдателей в режиме квазиреального времени.

2.1.2. В составе TCS DKIST более 100 механизмов перемещения. Их количество по мере создания новых инструментов будет только увеличиваться.

Основные требования к компонентам нижнего уровня АСУ — их простота и низкая стоимость, но одновременно высочайшая надёжность, удобство обслуживания и установки, защита от электромагнитных и электростатических помех. Выбранная линейка контроллеров должна обеспечить синхронизированное управление двигателями (от 2 до 30) и совместимый с Linux программный интерфейс на основе сокетов.

После анализа выбор создателей DKIST был сделан в пользу контроллеров серии Power PMAC [40]. Контроллер разработан для высокоточного многоосевого управления движением, обеспечивает лучшую в мире скорость выхода в заданную позицию при выполнении управления линейным двигателем и нанометровое позиционирование.

PMAC обеспечивает полный контроль замкнутого контура управления, положения, скорости, крутящего момента и тока каждого сервопривода с временем цикла 16,6 мкс на 1 ось (50 мкс на 8 осей). Высокоскоростное выполнение программ движения, генерации траектории и компенсации положения улучшают точность позиционирования и стабильность скорости.

Контроллер PMAC может быть запрограммирован в G-коде, ANSI C или на оригинальном языке программирования. Это позволяет создавать собственные управляющие программы. Можно использовать алгоритмы сервомашин, разработанные с помощью MATLAB, LabView, и программу, синхронизированную с ПИД-регулированием.

Контроллеры взаимодействуют с драйверами и устройствами ввода/вывода по каналу EtherCat.

Контроллер NY51-A совмещён с ПК, работающим под ОС Windows. Контроллер Power UMAC работает под ОС Linux RTOS. Контроллер Power Brick LV/AC объединяет контроллер, усилитель и каналы ввода/вывода.

2.2. Система ICS предназначена для управления регистрирующими инструментами, расположенными на платформах Несмита и куде, контроля и синхронизации с устройствами TCS.

В Европейском солнечном телескопе (EST) ICS подразделяется на систему управления регистрирующими инструментами и детекторы (CCD-видеокамеры) [16, p. 134].

Характеристики регистрирующих инструментов телескопов приведены в разд. 1.3.

2.3. Система DHS предназначена для сбора информации, поступающей от регистрирующей аппаратуры, её записи в промежуточные и долговременные архивы, обработки наблюдаемых данных, обеспечения возможности их повторного использования совместно с данными, полученными с помощью других телескопов, визуализации данных и результатов эксперимента в реальном масштабе времени.

В научных инструментах рассматриваемых телескопов планируется использование детекторов (камер) с разрешением 4000×4000 пикселей, разрядностью 2 байта. При скорости передачи 100 Гц поток экспериментальных данных по каждому инструменту составляет до 20–25 Гбит/с [41]. Например, при применении в процессе наблюдения трёх инструментов одновременно общий поток данных составляет уже 75 Гбит/с, для хранения которого при работе телескопа по 12 часов в сутки требуется объём архива 3,5 Пбит ($3,5 \cdot 10^{15}$ бит), а за неделю — 25 Пбит. Это минимальная оценка объёма базы научных данных DHS, которые запоминаются в хранилище.

Во многих экспериментах в реальном масштабе времени требуется визуализация, а в некоторых случаях, например при спеклинтерферометрии, обработка массива данных с разрешением и ритмом работы детекторов, для чего необходимо наличие в DHS вычислителя с сотнями параллельно работающих ядер.

Метаданные, т. е. данные, в которых содержатся метки времени, координаты наблюдаемого объекта или области Солнца и другие идентификаторы, записываются в репозиторий DHS для каждого кадра изображения научных данных. Часть метаданных, содержащая сведения о конфигурации и настройке детекторов и инструментов, о погодных условиях наблюдения, о температурных режимах оборудования и т. п., записывается в репозиторий с меньшей периодичностью.

Научные данные и метаданные, относящиеся к одному эксперименту, связываются вместе, снабжаются общим заголовком, например, в формате FITS (Flexible Image Transport System), и запоминаются в архиве, многократно превышающем 25 Пбит, в формате, совместимом с базой данных виртуальной обсерватории VOCDB. При проектировании телескопов, по крайней мере DKIST и EST, предусмотрен доступ исследователей, в том числе удалённых, к указанному архиву [41], чем обеспечивается режим виртуальной обсерватории.

2.4. Система OCS предназначена для управления обсерваторией. Она формирует и координирует необходимые для осуществления запланированных наблюдений последовательности действий, которые выполняются системами управления телескопом, инструментами, сбором и обработкой данных. Система OCS обеспечивает диспетчеризацию и мониторинг процесса наблюдения, совместную и безопасную работу подчинённых систем и оборудования, службу времени и синхронизации.

Система OCS обеспечивает средства планирования наблюдения: описание оптической схемы и ее модификаций, описание требуемых спектров (например, задание рабочей длины волны и отрезка спектрального диапазона) и необходимые для наблюдения погодные и временные условия. При планировании экспериментов могут применяться разработанные ранее сценарии (шаблоны). Для наблюдателей и инженерного персонала обсерватории OCS предоставляет интерфейсы пользователя (графический и командный).

Важная задача OCS — поддержание технологических подсистем обсерватории: устройства обеспечения питания, температурного режима, освещения, видеонаблюдения, обнаружения нештатных ситуаций, а также информационных сетей, метеостанции и т. д.

OCS телескопа DKIST состоит из трёх взаимосвязанных частей: Поддержка пользователя, Организация эксперимента и Организация работы оборудования [42].

Системы OCS, ICS, DHS, TCS присутствуют в составе АСУ всех рассматриваемых телескопов, но распределение функций между OCS, ICS и DHS у разных телескопов существенно отличается.

2.5. С учётом вышесказанного система управления перспективным солнечным телескопом должна соответствовать следующим требованиям:

- количество актюаторов устройств адаптивной оптики 256–1600 шт, частота формирования сигналов управления до 2 кГц;
- количество актюаторов устройств активной оптики 42–144 шт, частота управления ~ 50 Гц;
- разрешение сенсора датчика волнового фронта 1000×1000 пикселей (в перспективе 10000×10000), частота кадров до 2 кГц;
- количество каналов механических перемещений в составе TCS больше 100 шт;
- допустимые временные задержки на формирование команд управления исполнительными механизмами устройств TCS (без учёта устройств активной и адаптивной оптики) ~ 1 мс;
- время реакции механических частей на команды управления не более 30 мс;
- для научных приборов разрешение 4000×4000 пикселей, разрядность 16 бит, частота кадров до 100 Гц;
- объём данных, генерируемый научным прибором, 20–25 Гбит/с;
- объём хранилища данных, генерируемых телескопом за 12 часов, равен приблизительно $3,5 \cdot 10^{15}$ бит.

3. Рассматриваемые телескопы — инструменты коллективного пользования, их эксплуатация предполагается в нескольких режимах [16, р. 168].

3.1. Режим наблюдения в порядке планируемой очерёдности с использованием одной из стандартных конфигураций (шаблонов) телескопа и инструментов обеспечивает его максимальную производительность. Программа-планировщик заданий гарантирует выполнение телескопом каждого конкретного наблюдения только при наличии необходимых технических и погодных условий (например, значение r_0 , отсутствие облаков). Режим поддерживает коллективное использование телескопа. Для удалённого пользователя, имеющего доступ к базе данных обсерватории, получение и визуализация результатов эксперимента возможны почти в реальном масштабе времени.

3.2. Классический (монопольный) режим наблюдения применяется для задач, требующих специальных настроек и конфигурации телескопа или при использовании нештатных инструментов. Для проведения таких наблюдений необходимо согласование с руководителем научных исследований обсерватории. Предполагается, что классический режим возможен для наблюдателей, находящихся на телескопе или в рабочих помещениях обсерватории, расположенных в окрестностях. Визуализация данных производится в полном объёме непосредственно в процессе эксперимента.

3.3. Инженерный режим необходим для ввода в эксплуатацию любых новых подсистем или приборов, для подготовки инструментов, которые потребуются для запланированных наблюдений, а также для анализа произошедших сбоев. Режим технического обслуживания выполняется регулярно, калибровка научных инструментов — ежедневно.

Заключение. Рассмотрены и систематизированы характеристики перспективных солнечных телескопов наземного базирования с апертурой первичного зеркала более 1,5 м, которые обеспечивают пространственное разрешение на уровне дифракционного предела. На основании анализа опубликованных данных о телескопах: GREGOR, GST, NLST, DKIST, EST и КСТ определены базовые требования к автоматизированным системам управления обсерваторией, телескопом, регистрирующими инструментами, сбором и обработкой данных. Приведены требования к быстродействию устройств АСУ в контурах электромеханического управления, активной и адаптивной оптики и к объёму хранения данных, генерируемых телескопом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ковадло П. Г., Лубков А. А., Бевзов А. Н. и др.** Система автоматизации Большого солнечного вакуумного телескопа // *Автометрия*. 2016. **52**, № 2. С. 97–106.
2. **Хаббл (телескоп)**. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B1%D0%B1%D0%BB_\(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B1%D0%B1%D0%BB_(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF)) (дата обращения: 8.10.2018).
3. **Солнечный** телескоп Мак-Мат Пирса. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/McMath%E2%80%93Pierce_solar_telescope (дата обращения: 8.10.2018).
4. **Low-cost solar adaptive optics**. URL: <https://web.archive.org/web/20160221131712/http://www.noao.edu/noao/staff/keller/ira0/> (дата обращения: 8.10.2018).
5. **The GST (Goode Solar Telescope)**. BBSO Big Bear Solar Observatory. URL: <http://www.bbso.njit.edu/> (дата обращения 17.09.2018).
6. **Li Zh., Fang Ch., Guo Y. et al.** High-resolution observations of a large fan-shaped surge // *Astrophys. Journ.* 2016. **826**, N 2. 217L. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/826/2/217/pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
7. **A&A special issue: GREGOR first results** // *Astron. & Astrophys.* 2016. **596**. P. 1–2. URL: <https://www.aanda.org/images/stories/PressRelease/2016/gregor/prGREGOR.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
8. **Schlichenmaier R., von der Lühe O., Hoch S. et al.** Active region fine structure observed at 0.08'' resolution // *Astron. & Astrophys.* 2018. N AA_2016_28561. URL: <https://arxiv.org/pdf/1607.07094.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
9. **Denker C., Goode P. R., Ren D. et al.** Progress on the 1.6-meter new solar telescope at big bear solar observatory // *Proc. SPIE*. 2006. **6267**. 62670A. URL: <http://www.bbso.njit.edu/~pgoode/txt/txt/denker1303.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
10. **Observatories. GREGOR. Telescope and Optics**. URL: <http://www.leibniz-kis.de/en/observatories/gregor/telescope-and-optics/> (дата обращения: 8.10.2018).
11. **Denker C., von der Lühe O., Feller A. et al.** A retrospective of the GREGOR solar telescope in scientific literature // *Astron. Nachr.* 2012. **333**. N 9. P. 810–815. URL: <http://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/solanki/j361.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
12. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. M1 Assembly. URL: <https://dkist.nso.edu/tel/m1a> (дата обращения: 8.10.2018).

13. **Daniel K.** Top End Optical Assembly. URL: <https://dkist.nso.edu/tel/teoa> (дата обращения: 8.10.2018).
14. **National** large solar telescope Indian institute of astrophysics // Detailed Concept Design Study Rep. 2009. 291 p. URL: ftp://ftp.iiap.res.in/rangaraj/DPR_ver4.7.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
15. **Олемской С. В.** Реализация проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН». Докл. на засед. Президиума СО РАН. Новосибирск, 2017. URL: http://www.sbras.ru/files/files/prezidium20171221/1_olemskoj.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
16. **European** Solar Telescope // Conceptual Design Study Rep. 2011. **RPT-EST-0001**, Is. 2.A. 206 p. URL: <http://istar.ll.iac.es/files/58cef4ec1579d9e39754c76d5.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
17. **Shumko S., Gorceix N., Choia S. et al.** AO-308: the high-order adaptive optics system at Big Bear Solar Observatory // Proc. SPIE. 2014. **9148**. 914835. URL: https://www.researchgate.net/profile/Sergey_Shumko/publication/269320473_AO-308_The_high-order_adaptive_optics_system_at_Big_Bear_Solar_Observatory/links/54c158330cf25b4b80720f08/AO-308-The-high-order-adaptive-optics-system-at-Big-Bear-Solar-Observatory.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
18. **Schmidt W., von der Luhe O., Volkmer R. et al.** The 1.5 meter solar telescope GREGOR // Astron. Nachr. 2012. **333**, N 9. P. 796–809. URL: <http://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/solanki/j360.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
19. **1600-actuator deformable mirror prepped for Hawaii solar telescope** // Optics. org. 3 Aug., 2015. URL: <http://optics.org/news/6/7/44> (дата обращения: 8.10.2018).
20. **Northrop** Grumman Successfully Delivers Deformable Mirror for World's Largest Solar Telescope. July, 2015. URL: <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-successfully-delivers-deformable-mirror-for-world-s-largest-solar-telescope> (дата обращения: 8.10.2018).
21. **Johnson L., Cummings K., Drobilek M. et al.** Status of the DKIST Solar Adaptive Optics System // AO4ELT Conference Rep. Puerto de la Cruz, Tenerife, 28 June, 2017. URL: http://www.iac.es/congreso/AO4ELT5/media/wednesday/ao4elt5_marino.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
22. **Demidov M.** National Large Solar Telescope of Russia // Proc. of the 40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow, Russia, 2–10 Aug., 2014. Vol. 40. Id. D2.3-44-14. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014cosp...40E.681D> (дата обращения: 8.10.2018).
23. **Разработка** аванпроекта крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // Отчет о научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИСЗФ СО РАН в 2014 г. Иркутск: ФГБУН ИСЗФ СО РАН, 2015. С. 167–171. URL: http://ru.iszf.irk.ru/images/a/a2/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_%D0%98%D0%A1%D0%97%D0%A4_%D0%A1%D0%9E_%D0%A0%D0%90%D0%9D_%D0%B7%D0%B0_2014.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
24. **Soltau D., Berkefeld T., Sanchez Capuchino J. et al.** Adaptive optics and MCAO for the 4-m European Solar Telescope EST // Proc. SPIE. 2010. **7736**. 77360U. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7736/77360U/Adaptive-optics-and-MCAO-for-the-4-m-European-Solar/10.1117/12.856851.full> (дата обращения: 8.10.2018).
25. **Schmidt D., Marino J., Gorceix N. et al.** From Clear to DKIST: advancing solar MCAO from 1.6 to 4 meters // Proc. SPIE. 2018. **10703**. 1070326. URL: <https://>

- www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10703/1070326/From-Clear-to-DKIST-advancing-solar-MCAO-from-16/10.1117/12.2313787.full?SSO=1 (дата обращения: 8.10.2018).
26. **Ramachandra T. V., Mahapatra D. M., Boominathan M. et al.** Environmental Impact Assessment of The National Large Solar Telescope Project and its Ecological Impact in Merak Area // CES Tech. Rep. XXM. 2011. 88 p. URL: http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/water/paper/TR123/environmental_impact_assessment.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
 27. **Chae J., Park H.-M., Ahn K. et al.** Fast Imaging Solar Spectrograph of the 1.6 Meter New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory // Solar Phys. 2013. **288**, Is. 1. P. 1–22. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-012-0147-x> (дата обращения: 8.10.2018).
 28. **Cao W., Goode P. R., Ahn K. et al.** NIRIS - the Second Generation Near-Infrared Imaging Spectro-polarimeter for the 1.6 Meter New Solar Telescope // Proc. of the ASP Conference Ser. 2012. Vol. 463. P. 291. URL: http://www.bbso.njit.edu/nst_publ/Cao_NIRIS_2012.pdf (дата обращения: 8.10.2018).
 29. **Cao W., Gorceix N., Coulter R. et al.** Nasmyth focus instrumentation of the New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory // Proc. SPIE. 2010. **7735**. 77355V. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/84ab/1490d5e81016ec3075b3e8b4d60a2726df41.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
 30. **GREGOR** Fabry-Pérot Interferometer (GFPI). URL: <http://www.leibniz-kis.de/de/observatorien/gregor/scientific-instruments/> (дата обращения: 8.10.2018).
 31. **Collados M., Lopez L., Paez E. et al.** GRIS: The GREGOR Infrared Spectrograph // Astron. Nachr. 2012. **333**, N 9. P. 872–879. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/asna.201211738> (дата обращения: 8.10.2018).
 32. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. Instrumentation Suite and Configuration. URL: <https://dkist.nso.edu/CSP/instruments> (дата обращения: 8.10.2018).
 33. **Wöger F.** Visible Broadband Imager (VBI). URL: <https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/science/CSP/vbi171107.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
 34. **Von der Lühe O., Schmidt W.** Visible Tunable Filter (VTF). URL: <https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/science/CSP/vtf171106.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
 35. **Lin H.** Diffraction Limited Near Infrared Spectropolarimeter (DL-NIRSP). URL: <https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/science/CSP/dlnirsp171107.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
 36. **Kuhn J., Fehlmann A.** Cryogenic Near Infra-Red Spectro-Polarimeter (Cryo-NIRSP). URL: <https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/science/CSP/cryonirsp171107.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).
 37. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. High Level Controls/Software. URL: <https://dkist.nso.edu/controls> (дата обращения: 8.10.2018).
 38. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. Telescope Assembly. URL: <https://dkist.nso.edu/tel> (дата обращения: 8.10.2018).
 39. **Warner M., Rimmele T. R., Pillet V. M. et al.** Construction update of the Daniel K. Inouye Solar Telescope project // Proc. SPIE. 2018. **10700**. 107000V. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10700/107000V/Construction-update-of-the-Daniel-K-Inouye-Solar-Telescope-project/10.1117/12.2314212.full?SSO=1> (дата обращения: 8.10.2018).
 40. **DELTA TAU.** POWER PMAC - Motion Control Innovation. Controlling the Advanced Technology Solar Telescope. URL: <http://www.deltatau.com/Common/support/pressreleases/ATSTforWeb.pdf> (дата обращения: 8.10.2018).

41. **Ermolli I., Bettonvil F., Cauzzi G. et al.** Data handling and control for the European Solar Telescope // Proc. SPIE. 2012. **77400**. 77400G. DOI: 10.1117/12.856938. URL: https://www.researchgate.net/publication/229024484_Data_handling_and_control_for_the_European_Solar_Telescope (дата обращения: 8.10.2018).
42. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. Observatory Control System. URL: <https://dkist.nso.edu/controls/OCS> (дата обращения: 8.10.2018).

Поступила в редакцию 08.10.2018

После доработки 08.11.2018

Принята к публикации 26.11.2018
