

**ПРОЕКТ КРУПНОГО СОЛНЕЧНОГО ТЕЛЕСКОПА
С ДИАМЕТРОМ ЗЕРКАЛА 3 м**

**PROJECT OF THE LARGE
SOLAR TELESCOPE WITH MIRROR 3 m IN DIAMETER**

В.М. Григорьев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vgrig@iszf.irk.ru*

М.Л. Демидов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, demid@iszf.irk.ru*

Д.Ю. Колобов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kolobov@iszf.irk.ru*

В.А. Пуляев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vasiliiy_p@iszf.irk.ru*

В.И. Скоморовский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, skoal@iszf.irk.ru*

С.А. Чупраков

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, chupr@iszf.irk.ru*

Команда AMOS

*AMOS,
Льеж, Бельгия*

V.M. Grigoryev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vgrig@iszf.irk.ru*

M.L. Demidov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, demid@iszf.irk.ru*

D.Yu. Kolobov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kolobov@iszf.irk.ru*

V.A. Pulyaev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vasiliiy_p@iszf.irk.ru*

V.I. Skomorovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, skoal@iszf.irk.ru*

S.A. Chuprakov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, chupr@iszf.irk.ru*

AMOS team

*AMOS,
Liege, Belgium*

Абстракт. Одной из наиболее актуальных проблем современной физики Солнца являются наблюдения мелкомасштабной структуры солнечной атмосферы на разных уровнях (включая хромосферу и корону) и в разных спектральных линиях. Такие наблюдения возможны только с использованием крупных солнечных телескопов с диаметром основного зеркала не менее трех метров. В настоящее время в мире в процессе разработки или создания находятся несколько масштабных проектов таких крупных солнечных телескопов. В России начиная с 2013 г. ведется разработка отечественного крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м (КСТ-3), который является составной частью Национального гелиогеофизического комплекса РАН. Планируется, что телескоп будет расположен в Саянской солнечной обсерватории на высоте более 2000 м. Выбор был сделан в пользу классической осесимметричной оптической схемы Грегори с альт-азимутальной монтировкой. Научное оборудование КСТ-3 будет состоять из нескольких систем узкополосных перестраиваемых фильтров и спектрографов на разные диапазоны длин волн и размещаться как в основном фокусе куде на вращающейся платформе, так и в фокусе Несмита. Для достижения дифракционного разрешения предполагается использовать адаптивную оптику (АО) высокого порядка. При опреде-

Abstract. One of the most important problems of modern solar physics is the observation of the small-scale structure of the solar atmosphere at various heights (including the chromosphere and corona) in different spectral lines. Such observations can be made only with large solar telescopes whose main mirror has a diameter of at least 3 m. Currently, several large solar telescopes are under construction or development in the world. In 2013 in Russia, the work began on the development of a national large solar telescope with a mirror 3 m in diameter (LST-3), which is a part (subproject) of the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences. The telescope is planned to be located in the Sayan Solar Observatory at an altitude of more than 2000 m. The choice was made in favor of the classic axisymmetric Gregory optical layout on an alt-azimuth mount. The scientific equipment of LST-3 will consist of several systems of narrow-band tunable filters and spectrographs for various wave ranges. The equipment will be placed both in the main coude focus on a rotating platform and in the Nasmyth focus. To achieve a diffraction resolution, high-order adaptive optics (AO) will be used. It is assumed that with a certain modification of the optical configuration, LST-3 will work as a 0.7 m mirror coronagraph in near infrared lines and can also be used for observing astrophysical objects in the nighttime.

ленной модификации оптической конфигурации КСТ-3 будет работать как зеркальный коронограф с зеркалом диаметром 0.7 м в линиях ближнего инфракрасного диапазона, а также может быть использован для наблюдений астрофизических объектов в ночное время.

Ключевые слова: Солнце, корона, телескоп, пространственное разрешение, магнитные поля, поляризация, спектрограф, спектральные линии.

ВВЕДЕНИЕ

Немного истории

Физики-солнечники всегда мечтали о создании крупных солнечных телескопов. Это было естественно, поскольку они понимали, что основные физические процессы происходят в тонком атмосферном слое Солнца. Поэтому нужны телескопы, которые могут обеспечить измерения с пространственным разрешением, сравнимым с длиной свободного пробега фотона, и временным разрешением, сопоставимым с характерной шкалой изменений в газодинамике солнечной атмосферы.

Над проектами крупных солнечных телескопов с середины 20 века работают физики-солнечники Европы, США и России. Очевидно, что реализация проектов зависит от реальных финансовых и технологических возможностей. В США уже строится в настоящее время 4-метровый телескоп DKIST [Rimmele et al., 2010; McMullina et al., 2013], недавно на нем проведены первые наблюдения (первый свет), разрабатывается проект 4-метрового телескопа в Европе [Sánchez-Carpuchino et al., 2010], 8-метрового с кольцеобразным зеркалом Chinese Giant Solar Telescope в Китае [Liu et al., 2013]. В стадии технического проекта в России находится КСТ-3 — крупный солнечный телескоп с апертурой 3 м. Мечта о таком телескопе имеет давнюю историю.

В 80-х гг. прошлого века в рамках Комиссии многостороннего сотрудничества академий наук социалистических стран по комплексной проблеме «Планетарные геофизические исследования» (КАПГ) была утверждена тема «Разработка научных и научно-технических проблем, связанных с созданием объединенной солнечной обсерватории соцстран». Основным инструментом обсерватории должен был стать большой солнечный телескоп с диаметром главного зеркала не менее 2 м. Рабочая группа 4-1.1 КАПГ под руководством члена-корреспондента АН СССР Степанова В.Е. подготовила в 1986 г. документ «Научные и научно-технические предложения на объединенную солнечную обсерваторию». В 1989 г. Президент АН СССР академик Марчук Г.И. направил письма президентам академий наук соцстран. Все поддержали идею создания такой обсерватории и направили ответственных представителей от своих академий наук. Политические события начала 90-х гг. 20 века остановили этот конструктивный процесс. Однако был разработан и изготовлен комплекс при-

Keywords: Sun, corona, telescope, spatial resolution, magnetic fields, polarization, spectrograph, spectral lines.

боров для исследования астроклимата, выполнены предварительные исследования ряда пунктов в Узбекистане, Туркмении, Таджикистане и Дагестане и намечены перспективные пункты для более тщательных исследований.

Взаимодействие Рабочей группы КАПГ с предприятием Карл Цейс Йена и Ленинградским оптико-механическим объединением (ЛОМО) было направлено на разработку концепции большого солнечного телескопа и системы малых инструментов. В результате обсуждения и анализа достоинств и недостатков полностью вакуумированных телескопов и полностью открытых телескопов Рабочая группа пришла к концепции частично вакуумированной башенной солнечной установки. Предприятие Карл Цейс Йена представило эскизную проработку конструкции телескопа с оригинальным и эффективным способом погодной защиты оптической системы телескопа.

В конце 90-х гг. возобновилась инициативная проработка крупного телескопа. Научные сотрудники ИСЗФ СО РАН и инженеры ЛОМО рассмотрели и предложили новую концепцию большого альт-азимутального телескопа. Предлагалась классическая система Грегори с дополнительным плоским зеркалом в качестве входной апертуры. Система объединяла достоинства целостных систем горизонтальных солнечных телескопов и симметричной альт-азимутальной системы. Эта концепция была представлена на 1-й Всероссийской конференции в 2001 г. в Санкт-Петербурге [Григорьев и др., 2001] и на специальной сессии 26-й конференции Международного астрономического союза в 2006 г. в Праге [Grigor'ev et al., 2006].

В 2013 г. было открыто финансирование и началась разработка технического проекта Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м (КСТ-3), который является составной частью Национального гелиогеофизического комплекса РАН.

Общие требования к телескопу

Основная цель КСТ-3 — получение новой информации о тонкой структуре магнитных полей на разных уровнях атмосферы от самых глубоких до короны. При этом детальное изучение плазменных процессов в магнитном поле на Солнце должно помочь решению многих фундаментальных задач не только солнечной физики, но и физики межпланетного пространства, а также пониманию солнечно-земных связей и явлений на других звездах. Предполагается, что пространственное разреше-

ние КСТ-3 составит 0.1", спектральное — до 300 000 в диапазоне от 0.4 до 3 мкм, инструментальный рассеянный свет в коронографической моде — $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ от интенсивности фотосферы на расстоянии от лимба $R/R_{\odot} = 1.15$ в ИК-диапазоне, инструментальная поляризация — $< 10\%$.

Таким образом, для обеспечения высокого пространственного, спектрального и временного разрешения солнечной структуры на диске и в короне необходим телескоп с 3-метровым глубоко отполированным главным зеркалом. Для слежения за Солнцем 3-метровое тяжелое зеркало не может быть установлено на классической экваториальной монтировке, а только на альт-азимутальной (горизонтальной), обеспечивающей оптимальную разгрузку телескопа, его зеркал и работу приводов. Крупногабаритные фокальные инструменты (спектрографы, фильтрографы) располагаются под телескопом на платформе, которая согласованно вращается с телескопом, следящим за Солнцем, чтобы обеспечить стационарное положение изображения Солнца на приемных устройствах.

При сооружении солнечного телескопа надо иметь в виду тепловые проблемы. Зеркала находятся под воздействием солнечной тепловой нагрузки, что может ухудшить качество изображения телескопа. Основное требование к температурному режиму — температуры всех поверхностей телескопа должны быть как можно ближе к температуре окружающей среды, желательно на 1–2 К ниже. Главное зеркало отражает более 5000 Вт, влияние такого нагрева трудно устранить, поэтому полезное поле телескопа необходимо на порядок уменьшить с помощью тепловых диафрагм. Очень важно для зеркал выбрать правильную пассивную систему разгрузки, возможно, механическую и пневматическую, чтобы она не создавала напряжение в зеркалах, которое приводит к деформации поверхности, особенно больших зеркал, подверженных тепловым и гравитационным изменениям. Активная механическая система должна быть направлена на исправление остаточной деформации поверхности главного зеркала. Необходимые данные о форме поверхности зеркала для этого могут быть получены от датчиков волнового фронта адаптивной системы, предназначенной для быстрой коррекции искажений изображения Солнца, возникающих на разных высотах земной атмосферы. Влияние на качество изображения температурных градиентов в воздухе непосредственно над оптической поверхностью можно ограничить сметанием «воздушным ножом» нагретого или охлажденного воздуха с поверхности зеркала.

Выбор для КСТ-3 осевой зафокальной оптической системы Грегори, в которой вторичное зеркало расположено за фокусом главного зеркала, обусловлен лучшей защищенностью от паразитной засветки и лучшими возможностями контроля температурного режима. Установка в главном фокусе зеркала диафрагмы поля зрения с отводом тепла (heat-stop) дает возможность ограничения светового потока, падающего на вторичное зеркало и, следовательно, в последующую оптическую систему. Появляется возможность проведения коронографических наблюдений по схеме Лию с внутренним затмением.

Планируется, что телескоп будет расположен в башне высотой 30 м, диаметром 20 м, с куполом, аналогичным куполу DKIST. Башня будет оборудована лифтовой шахтой, к ней будет примыкать трехэтажный технический корпус.

НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ КРУПНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Научные цели, конечно, меняются со временем, возникают новые задачи, обусловленные результатами исследований на телескопе и развитием солнечной физики. Поэтому конструкция телескопа должна быть выполнена таким образом, чтобы адаптировать его к новым научным задачам. Ниже приведены цели КСТ-3, которые можно сформулировать с учетом требований солнечной и солнечно-земной физики настоящего времени.

Природа магнитных полей и цикла солнечной активности

В солнечной физике достижение высокого пространственного разрешения всегда было необходимо для решения важных научных проблем. И в настоящее время исследование тонкой структуры остается актуальной задачей. Сегодня понятие высокого разрешения имеет более широкий смысл и включает высокое пространственное (0.1–0.2 угл. сек), временное (< 1 с) и спектральное разрешение (~ 10 мÅ).

Типичная временная шкала процессов в солнечной фотосфере, определяемая высотой однородной атмосферы и скоростью звука, составляет порядка 10 с. Еще меньшая оценка порядка 1 с следует из соображений о релаксации излучения. Проблемы с временным разрешением неизбежно возникают и при использовании адаптивной оптики, так как временная шкала турбулентности в атмосфере Земли $\ll 1$ с.

Пожалуй, требования пространственного, временного и спектрального разрешения соединяются в стоксомерии и диагностике тонкой структуры солнечных магнитных полей. Измерения вектора магнитного поля требуют высокого пространственного разрешения, вероятно, даже выше, чем при измерениях интенсивности. Эта необходимость возникает из-за нелинейной зависимости поляризации в линии от ориентации магнитного поля. Пространственно усредненные профили параметров Стокса дают вектор магнитного поля, который может значительно отличаться от пространственно усредненного истинного магнитного поля.

Для понимания физики солнечной активности и солнечной переменности необходимо понимание того, как на Солнце генерируются и диссипируют магнитные поля. Все еще остается не до конца ясной природа 11-летнего цикла солнечных пятен и 22-летнего цикла глобального магнитного поля. Нужно отметить, что в энергию магнитного поля Солнца переходит только малая доля (10^{-5}) энергии, производимой в ядре Солнца термоядерными процессами, хотя именно магнитное поле является движущей силой всех динамических явлений на Солнце. Можно себе представить, что происходит на других звездах,

где общее магнитное поле звезды более чем в 1000 раз превышает общее магнитное поле Солнца. Процесс генерации магнитного поля или динамо на Солнце и звездах все еще таит много загадок.

Развитые сегодня динамо-модели, объясняющие поведение крупномасштабных магнитных полей Солнца, основаны на теориях среднего поля. Однако определяющие параметры, такие как коэффициент диффузии и спиральность, которые заложены в эти модели и связаны с мелкомасштабными процессами, в настоящее время не измеряются.

Трехмерное моделирование турбулентных потоков с большим числом Рейнольдса показывает, что каждый масштаб турбулентных движений приводит к появлению собственной системы масштабов магнитного поля. Хотя компьютерное моделирование таких сложных процессов не всегда адекватно отражает физическую суть взаимодействия движения плазмы и магнитного поля, но, по крайней мере, ставит много вопросов, на которые должны дать ответ наблюдения. Как взаимодействуют слабые и сильные магнитные поля? Почему на больших участках солнечной поверхности магнитные элементы тонкой структуры имеют преимущественно одну полярность? Крупномасштабное магнитное поле связано с когерентными свойствами тонкой структуры или, наоборот, когерентные свойства мелкомасштабной структуры определяют крупномасштабное поле? Для теорий среднего поля это безразлично, а для физики солнечных магнитных полей принципиально важно. Какой вклад вносят магнитные поля разного масштаба в магнетизм хромосферы и короны и их нагрев?

Ответить на эти вопросы можно только с помощью крупного телескопа, способного разрешить структуру отдельных трубок потока и наблюдать их появление, развитие и исчезновение.

Для решения проблемы слабых крупномасштабных магнитных полей на Солнце и их связи с мелкомасштабными магнитными элементами важны измерения магнитных полей в ИК-диапазоне спектра с помощью крупного телескопа. Посредством зеемановского расщепления в линиях FeI 1.565 мкм в нижней фотосфере и MgI 12 мкм в верхней фотосфере можно измерить магнитные поля слабее 100 Гс. Используя эти линии, можно измерить ход напряженности магнитного поля с высотой до области, где магнитная энергия превосходит кинетическую энергию газа и магнитное поле освобождается от влияния движения плазмы.

ИК-область является естественной спектральной областью для исследования магнитных полей, потому что отношение зеемановского расщепления к ширине линии пропорционально длине волны. Достижения в технологии ИК-приемников открывают новую эпоху в исследовании солнечных магнитных полей. Становится возможным наблюдать профили параметров Стокса в длинах волн, где линии намного более чувствительны к зеемановскому расщеплению по сравнению с видимой областью спектра. Особенно это относится к ридберговским эмиссионным линиям высоких порядков, которые вблизи 12 мкм показы-

вают нормальное зеемановское расщепление, которое превосходит ширину линии в интервале напряженностей поля ~300 Гс.

Получение параметров вектора магнитного поля из измерений стокс-профилей на 12 мкм кажется относительно простым, исключая многие сложности, которые возникают на более коротких волнах. Однако ограничения обусловлены механизмом, который вызывает эмиссию в этих линиях и еще не до конца понят, хотя, возможно, он связан с нетепловыми процессами.

Недавно открыта яркая корональная линия SiIX 3.932 мкм в ИК-области спектра, кроме того, есть и другие линии в ближней ИК-области. Если оптику крупного телескопа и его конструкцию выполнить так, чтобы обеспечить уровень рассеянного света < 0.5 %, это обеспечит работу телескопа в коронографической моде. Конечно, это предъявляет высокие требования к полировке зеркала, однако, если работать в ИК-области спектра, они не будут сильно отличаться от стандартных требований к полировке зеркал.

Свет, рассеянный на микрошероховатостях зеркала, обратно пропорционален квадрату длины волны, т. е. $\sim \lambda^{-2}$. В зеленой области спектра для зеркал коронографа обычно предъявляется требование, чтобы среднеквадратичная величина шероховатости не превышала 3–5 Å — в ИК-области это будет соответствовать 20–40 Å (стандартное требование качества астрономических зеркал). Коронографическая мода крупного телескопа в ИК-диапазоне дает единственную возможность измерения магнитных полей и движений в короне с высоким пространственным разрешением.

Наиболее интересные результаты следует ожидать от исследований магнитных полей ниже фотосферы методами локальной гелиосейсмологии, а также исследований в ИК-области спектра мелкомасштабной активности и магнитных полей в солнечной короне.

Фундаментальную роль в эволюции и структуре солнечных магнитных полей различных пространственных и временных масштабов играет магнитная спиральность, необходимая для эффективного действия динамо. С другой стороны, чрезмерная спиральность может подавлять действие динамо. Чтобы не было этого подавления, спиральность из области динамо должна передаваться в корону. Корональные магнитные поля накапливают спиральность до некоторого предела, после чего сбрасывают ее с помощью корональных выбросов массы (КВМ).

Векторные магнитограммы самого высокого пространственного разрешения и высокого временного разрешения необходимы, чтобы получить решающую информацию об эволюции скрученности магнитного поля во время появления нового магнитного потока и его развития.

Телескоп должен обеспечить ультравысокое разрешение вектор-магнитограмм для исследования внутренней структуры мелкомасштабных трубок магнитного потока и движений плазмы в их окру-

жения. Крупномасштабные активные области затухают через дисперсию потока в меньшие масштабы с последующей транспортировкой этих мелкомасштабных магнитных полей в 22-летнем цикле активности. Силовые линии магнитного поля служат каналами передачи конвективной энергии в хромосферу и корону, которые являются источниками ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Излучение в этом диапазоне вызывает эффекты в ионосфере и атмосфере Земли.

Роль хромосферы как связующего звена между короной и фотосферой

Связь конвективных движений и магнитного поля фотосферы со структурой и динамикой короны осуществляется через хромосферу. Хромосфера находится в основании короны, поэтому решение многих задач физики короны находится в области хромосферно-коронального взаимодействия. Хромосфера сильно стратифицирована: концентрация частиц изменяется на четыре порядка, температура растет до 10^6 К на границе с короной. Особенно важно, что она обнаруживает динамичную тонкую структуру, основными элементами которой являются спикюлы и фибриллы. Фибриллярная структура отражает характер магнитных полей, которые выносятся из фотосферы в хромосферу. Фибриллы показывают пеструю структуру магнитного поля.

Уникальность хромосферы состоит в том, что в ней происходит переход отношения β кинетической энергии к магнитной от $\beta < 1$ к $\beta > 1$. Хромосфера содержит сложную поверхность с $\beta = 1$. Выше этой поверхности уже выполняются условия бессилового магнитного поля. Обычно вблизи этой поверхности возникают или трансформируются МГД-колебания.

С ростом температуры в хромосфере растет ионизация и происходит трение ионов с нейтралами. Это приводит к различной проводимости плазмы вдоль и поперек силовых линий магнитного поля. Уменьшение проводимости поперек магнитного поля способствует диффузии поперек поля, что может влиять на выход горизонтальных магнитных полей в хромосферу.

Столкновение ионов с нейтралами играет важную роль в диссипации энергии магнитных флуктуаций. Она происходит эффективнее, если магнитные флуктуации имеют более высокие частоты, поэтому хромосфера служит низкочастотным фильтром для магнитных флуктуаций определенного типа. Хромосфера может подавлять высокочастотные фотосферные флуктуации в спектре флуктуаций, входящих до короны.

Выше указана только часть задач хромосферно-коронального взаимодействия, которые нуждаются в наблюдениях одновременно в спектральных линиях хромосферы и короны с высоким временным и пространственным разрешением.

Магнитная нестабильность: солнечные вспышки и корональные выбросы массы

В настоящее время не существует моделей солнечных активных областей, которые могут обеспечить точное количественное предсказание, когда и где

будет происходить активность на Солнце, или предсказать величину эмиссии в результате активности. Точность предсказания солнечной активности ограничена неполным пониманием происходящих физических процессов в эволюции солнечной атмосферы.

Достижение сверхвысокого разрешения может стать ключом в понимании природы основных геоэффективных солнечных явлений: вспышек, активных протуберанцев и корональных транзиентов.

Локальное накопление энергии вспышек и ее внезапная реализация представляют как теоретический, так и практический интерес для предсказания рентгеновской и корпускулярной эмиссии Солнца.

Предложено несколько теорий вспышек, но ни одна из них не развита полностью и не проверена наблюдениями. Для проверки теоретических гипотез и разработок сложно поймать развитие вспышки из-за экстремально быстрой эволюции. С точки зрения предсказания солнечных вспышек более важна эволюция, предшествующая вспышке, и ситуация, в которой она происходит. Из-за того что большие вспышки не являются частым явлением, кажется, что процесс накопления большого количества энергии и путь, которым она внезапно реализуется, можно объяснить только особыми условиями.

Существующие сегодня наблюдательные методы кажутся недостаточными для полного определения того, как, где и когда возникают условия генерации больших вспышек. Теоретические исследования показывают, что токовые слои развиваются движениями плазмы в окружении нулевых точек (линий) магнитного поля. Такие слои, естественно, фрагментарны и могут приводить к тиринг-неустойчивости, которая обеспечивает быструю диссипацию.

Если мы получим информацию о процессе формирования и развития токового слоя в хромосфере и короне Солнца, будем иметь ключ к решению проблемы вспышек и сможем построить МГД-модель накопления энергии и спускового механизма вспышки. Для этого необходимы измерения вектора магнитного поля на различных высотах в атмосфере и, что особенно важно, в самой хромосфере. Поэтому одной из важнейших задач для солнечного оптического телескопа должно быть получение векторных магнитограмм одновременно в нижней фотосфере в линиях FeI 15648 и 15652 Å, в фотосфере в одной из хорошо известных линий FeI 5250, 6173 или 6302 Å, в хромосфере в линиях H и K CaII и в короне в ИК-линиях.

Важную роль в моделях диссипации энергии и ускорения заряженных частиц во вспышках и при других геоэффективных явлениях (эрупция волокон, транзиенты и др.) играют электрические поля. В теоретических исследованиях предсказывается электрический потенциал 100–500 кВ во время импульсной фазы вспышки и электрическое поле во время магнитного пересоединения в поствспышечных петлях. Ориентация электрического поля 1–100 В/см во вспышках относительно магнитного поля в разных моделях различна. Измерения макроскопических электрических полей в этих структурах может служить тестом для разных моделей. Для измерения электрических полей используется линейный эффект Штарка в линиях с высоким главным квантовым числом водородной

серии Бальмера и Пашена. Измеряется линейная поляризация по контуру этих линий. Спектральный диапазон для линий серии Бальмера составляет 3750–5650 Å, для серии Пашена — 8300–8500 Å.

Одновременные наблюдения эруптивных протуберанцев, вспышек на лимбе и солнечной короны могут стать ключевыми в понимании механизма возникновения КВМ (транзиевтов). Они особенно важны для изучения начальной фазы развития крупномасштабной неустойчивости магнитного поля в короне и стадии ускорения транзиевта.

Термическая структура и магнитное поле корональных петель

Солнечные корональные события, подобные вспышкам и КВМ, оказывают прямое воздействие на околоземную среду. Эти события сопровождаются перестройкой магнитных петель в короне. Как связаны эти два процесса, остается неясным из-за отсутствия фундаментальных знаний об этих явлениях. Прежде всего, не хватает знаний о физике корональных петель и их взаимодействии друг с другом и их окружением. Почему корональные петли в 1000 раз горячее, чем поверхность Солнца? Каких значений достигают магнитные поля, плотность и скорость плазмы внутри корональных петель? Почему некоторые петли резко изменяются, хотя другие остаются достаточно стабильными? Ответы на эти фундаментальные вопросы могут дать наблюдения с помощью телескопа нового поколения с супервысоким пространственным разрешением. Должна быть возможность определения сложных непотенциальных корональных магнитных полей активных областей с помощью измерений вектора магнитного поля в фотосфере и хромосфере и продольной компоненты магнитного поля в короне.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА КСТ-3

При определении конфигурации оптической схемы мы постарались максимально использовать мировой опыт разработок крупных солнечных телескопов с учетом реальных возможностей отечественной науки и промышленности. Кроме того, нашей целью было наделять создаваемый телескоп возможностями решения некоторых дополнительных специфических задач, которые не предусмотрены в мировых аналогах. Это, в частности, спектральные наблюдения Солнца и других астрофизических объектов с помощью автоколлимационного спектрографа в фокусе Несмита, а также коронографическая мода наблюдений с использованием сегмента главного зеркала с суперпрецизионной полировкой. Принципиально важным стало также принятие решения использовать для научных приборов на вращающейся платформе фокуса куде с фокусными расстояниями 40 и 80 м отдельную согласующую оптику, перестраивающую фокусное расстояние системы 220 м после зеркала М3, как показано на рис. 1, 2. Для фокуса Несмита согласующая система установлена в сходящихся пучках после зеркала М3 перед фокальной плоскостью 220 м (рис. 3).

В состав объектива телескопа (рис. 1) входят следующие основные компоненты: узел главного

активного зеркала М1 из церодура в оправе с системой охлаждения и очистки; смонтированное на гексапode вторичное зеркало М2 из карбида кремния в оправе, снабженной системой tip-tilt и системой охлаждения; зеркала М3, формирующие квазипараллельный (слабосходящийся) пучок и направляющие его в систему Несмита и куде; средства адаптации оптической схемы для работы в режиме коронографа; теплопоглощающая диафрагма поля в главном фокусе; включаемые и исключаемые из схемы компенсаторы вращения изображения в фокусе куде и фокусе Несмита М7, М8 и М9; зеркальные перестраивающие системы М13, М14, устанавливаемые на вращающейся платформе куде и платформе Несмита и формирующие фокусные расстояния 80 и 40 м (куде), 20 м (Несмит); вращающаяся платформа в фокусе куде.

Особенности и ограничения оптической схемы

Как отмечалось выше, телескоп должен быть построен по осесимметричной схеме с доступной промежуточной фокальной плоскостью главного зеркала. Это необходимое условие использования телескопа в режиме зеркального коронографа, особенности которого будут рассмотрены далее. Традиционно для схемы Грегори в солнечных телескопах в промежуточной фокальной плоскости устанавливается диафрагма поля зрения (field-stop), предназначенная для улучшения термических условий на последующих оптических элементах. После этой диафрагмы в оптическую систему пропускается лишь небольшой участок изображения Солнца, соответствующий рабочему полю зрения $2\omega=2'$.

Конструкция телескопа предполагает использование альт-азимутальной монтировки и стационарное размещение спектрального и фильтрового оборудования в фокальных плоскостях с разными фокусными расстояниями на вращающейся платформе азимутальной оси (фокус куде) и платформе оси высот (фокус Несмита). Решено выбрать относительное отверстие главного зеркала $D/F=1:1.88$. Отношение D/F является принципиально важным параметром при изготовлении и эксплуатации солнечного телескопа, причем уменьшение светосилы желательно для упрощения процесса изготовления и смягчения требований к точности юстировки оптических элементов. Диаметр вторичного зеркала М2 680 мм также является критичной величиной при изготовлении. Его увеличение оказалось крайне нежелательно при дальнейшей детальной проработке оптической схемы и дизайна телескопа.

Для обеспечения наблюдений Солнца в различных условиях (размеры наблюдаемой области, пространственное разрешение) в оптической схеме КСТ-3 предусмотрены следующие фокусные расстояния: 20 м (1:6.667) в фокусе Несмита; 40 и 80 м (1:13.334 и 1:26.667) в фокусе куде. Предусмотрено выполнение условия телецентричности светового пучка. Положение фокальной плоскости при любых режимах должно предусматривать возможность установки крупногабаритного спектрального и фильтрового оборудования.

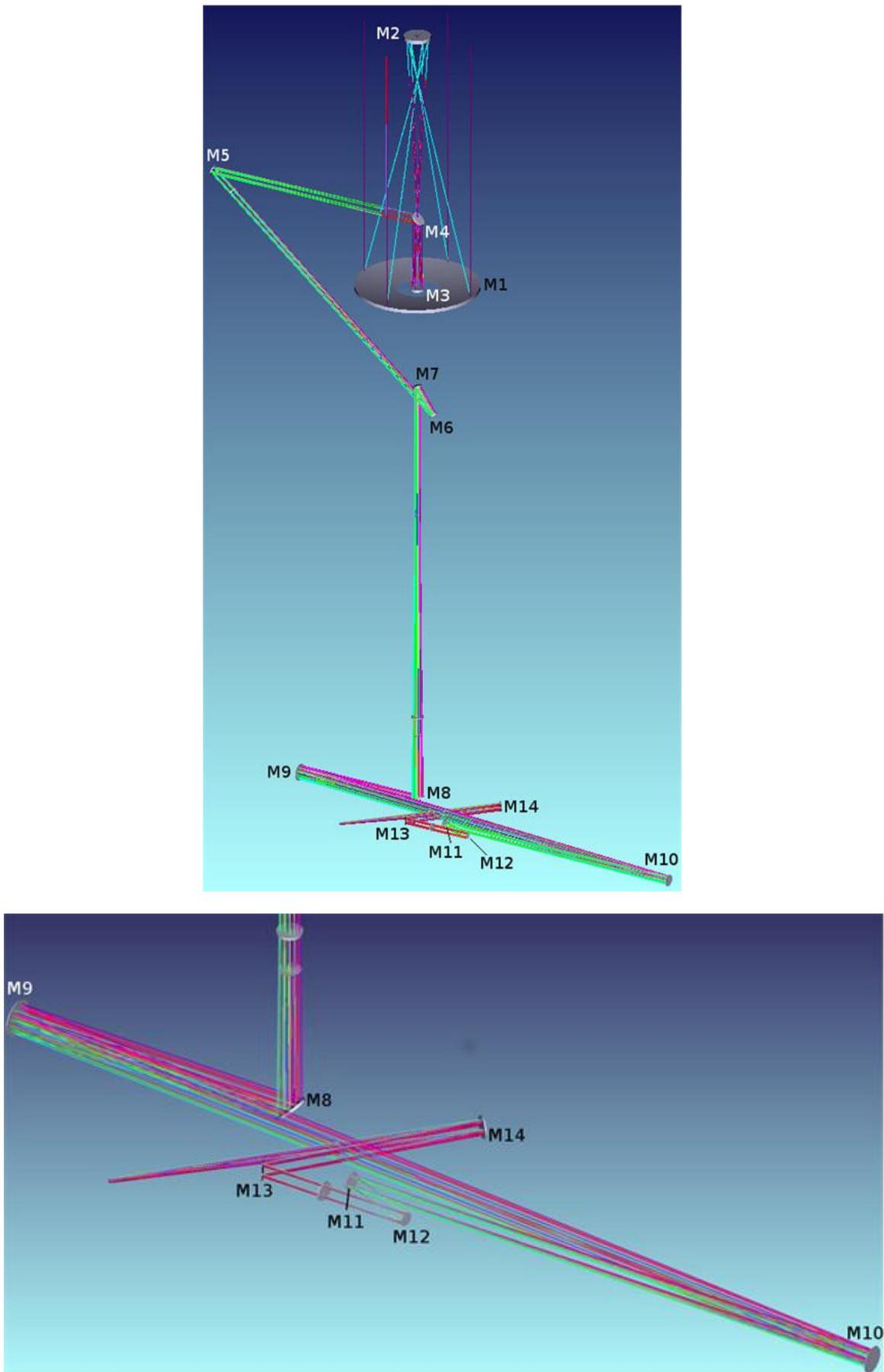


Рис. 1. Вариант оптической схемы куде телескопа КСТ-3 с фокусным расстоянием 80 м: вверху — общий вид, внизу — подробный вид области зеркал M9, M10 и M14

Сформулированные выше требования реализованы в вариантах оптических схем КСТ-3, приводимых ниже. Предлагаемые схемы являются пяти- и шестизеркальными с двумя промежуточными фокусами между зеркалами М1 и М2 и после зеркала М3 в схемах 80 м и 40 м фокусах куде и после зеркала М5 в фокусе Несмита.

Фокус куде

Фокусное расстояние 80 м

Общий вид системы показан на рис. 1, а конструктивные параметры приведены в табл. 1. Фокусное расстояние формируется внеосевым параболическим зеркалом М14, установленном в параллельном пучке после коллиматорного зеркала М9, строящего лучок на деформируемом зеркале адаптивной оптической системы (АОС), состоящей из коллиматорного зеркала М9, зеркала tip/tilt М11 и деформируемого зеркала М12. Смещение сегмента с оси параболы составляет 342 мм при световом диаметре 250 мм. При этом обеспечивается удобное расположение фокальной плоскости и телецентрический ход лучей, удобный для согласования оптических систем научного оборудования.

Таблица 1

Параметры оптической схемы куде,
фокусное расстояние 80 м

№ поверхности	Обозначение на рис. 1	Радиус кривизны, мм	Расстояние, мм ¹	Коническая константа (-e ²)
1	М1	-11300	-6800	-1
2	М2	1847.9	6800	-0.368
3	М3	-3800	-31062.2	-0.669
4	М9 (коллиматор АОС)	-22191.9	22521.8	0
5	М14 (f=80 м)	-8093.8	-4021.8	-1

¹Расстояния без учета положения плоских ломающих зеркал

Перестраивающая система, состоящая из одиночного внеосевого параболического зеркала малой светосилы, совместно с двухзеркальной АОС обеспечивает дифракционное качество изображения, концентрация энергии >80 % в видимом диапазоне, вплоть до 0.38 мкм в кружке диаметром 0.1 угл. сек (38.8 мкм) с учетом влияния центрального экранирования. Обычно в приборах такой сложности, как КСТ-3, основной вклад в уменьшение концентрации энергии вносят такие факторы, как нестабильность формы поверхностей, атмосферные деформации волнового фронта и влияние температурных неоднородностей воздуха в длинных оптических трактах. Все они компенсируются методами активной и адаптивной оптики, которая, будучи установлена вблизи рабочих фокальных плоскостей, исправляет в том числе и деформации волнового фронта расчетной оптической системы.

Фокусное расстояние 40 м

Общий вид системы показан на рис. 2, а конструктивные параметры приведены в табл. 2. Оптическая система с фокусным расстоянием 40 м расположена на платформе куде после коллиматорного зеркала М9 и компонентов АОС. Камерная часть является двухзеркальной зафокальной системой, в которой зеркала М9 и М10 представляют собой децентрированную систему брахит типа Грегори с большим параметром положения вторичного зеркала. При этом обеспечивается телецентрический ход лучей, необходимый для научного оборудования.

Таблица 2

Параметры оптической схемы куде,
фокусное расстояние 40 м

№ поверхности	Обозначение на рис. 5	Радиус кривизны, мм	Расстояние, мм ¹	Коническая константа (-e ²)
1	М1	-11300	-6800	-1
2	М2	1847.9	6800	-0.368
3	М3	-3800	-31062.2	-0.669
4	М9 (коллиматор АОС)	-22191.9	21429.3	0
5	М13	-1530.6	-1663.7	-0.838
6	М14	1303.6	2375	-0.256

¹Расстояния без учета положения плоских ломающих зеркал

Зеркала М13 и М14 представляют собой сегменты эллипсоидов со смещениями с оси 152 и 178.5 мм соответственно и одинаковыми световыми диаметрами 220 м. Для такой высокоапертурной системы, какой является КСТ-3, фокусное расстояние 40 м даже для рабочего поля $2\omega=2'$ следует отнести к малым (относительное отверстие 1:13.3). Для такой системы получение высокого качества коррекции aberrаций является нетривиальной задачей. Тем не менее, перестраивающая двухзеркальная система позволила добиться дифракционного качества, по крайней мере, в пределах половины рабочего поля зрения. Концентрация энергии в среднем по полю в кружке диаметром 0.1 угл. сек. (19.4 мкм) >75 %, как и в схеме с фокусным расстоянием 80 м, вплоть до синей границы видимого диапазона. Как и в случае с фокусным расстоянием 80 м, справедливы все замечания о вкладе в концентрацию изображения факторов, не связанных с погрешностями как расчета, так и изготовления сложных внеосевых оптических поверхностей, которые для рассматриваемой системы с фокусным расстоянием 40 м неизбежны.

Фокус Несмита

Фокусное расстояние 20 м

Общий вид системы показан на рис. 3, а конструктивные параметры приведены в табл. 3. В этом случае зеркала М5 и М6 представляют собой децентрированную систему брахит типа Грегори с внутренним положением фокальной плоскости. При этом обеспечивается телецентрический ход лучей, необходимый для научного оборудования.

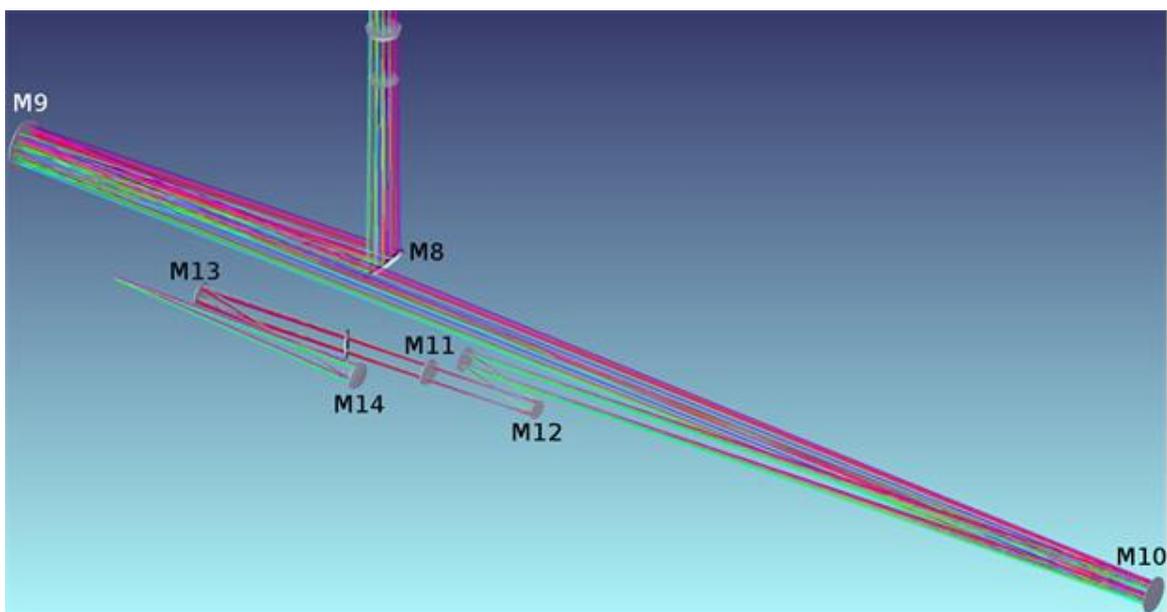
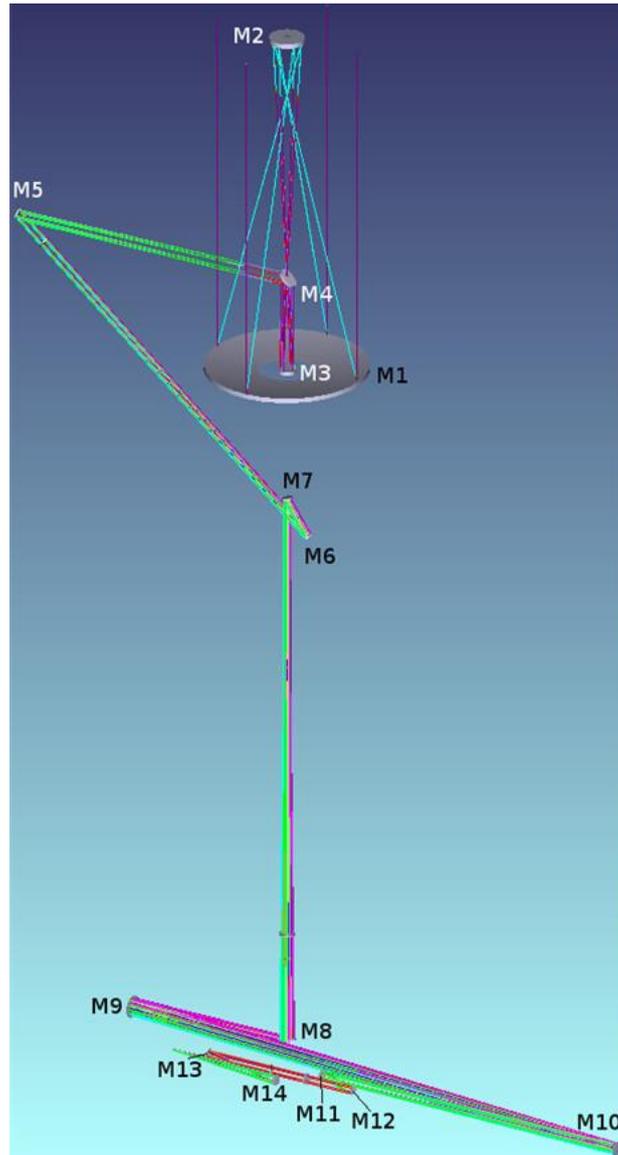


Рис. 2. Вариант оптической схемы куде телескопа КСТ-3 с фокусным расстоянием 40 м: вверху — общий вид, внизу — подробный вид области зеркал M9, M10

Таблица 3
Параметры оптической схемы Нэсмита,
фокусное расстояние 20 м

№ поверхности	Обозначение на рис. 5	Радиус кривизны, мм	Расстояние, мм ¹	Коническая константа ($-e^2$)
1	M1	-11300	-6800	-1
2	M2	1847.8	6800	-0.368
3	M3	-3800	-5650	-0.669
4	M5	-773.4	702.4	-1.05
5	M6	505.7	-1020.4	-0.334

¹Расстояния без учета положения плоских ломающих зеркал

Фокусное расстояние 20 м является, по нашему мнению, близким к критическому для двухзеркальной перестраиваемой системы на поле $2\omega=2'$. Соблюдение условия телецентричности требует минимального увеличения на последнем силовом зеркале М6, представляющем собой сегмент эллипсоида со смещением с оси 111 мм и световым диаметром 210 мм, а его максимальная асферичность при этом достигает 214 мкм. Зеркало М5 является сегментом гиперболоида со смещением 136 мм, световым диаметром 280 мм и максимальной асферичностью 510 мкм. Тем не менее, в настоящее время технологии полировки и контроля подобных поверхностей успешно применяются на ряде предприятий мира и России. Для контроля используются простые и недорогие в реализации голографические компенсаторы, а полировка производится на станках с программным управлением движения инструмента. Сейчас для космических и военных целей успешно изготавливаются поверхности с градиентом асферичности, на порядок большим.

Как видно из рис. 4, даже с двухзеркальной перестраиваемой системой доступно дифракционное качество коррекции аберраций на требуемом рабочем поле зрения. За исключением незначительных дисторсионных искажений (<0.4 %) концентрация энергии с учетом центрального экранирования в кружке 0.1 угл. сек по всему полю также >75 %, по крайней мере, в красной области спектра. Кроме ранее упомянутого влияния на качество изображения факторов для каналов с фокусными расстояниями 80 и 40 м, не связанных с расчетом и изготовлением оптической системы, в канале со столь значительным относительным отверстием (1:6.67) приобретает значение проблема передачи качества коррекции аберраций от телескопа к инструментам. Схема с фокусом 20 м будет включать два основных рабочих прибора: фильтрограф малого поля на основе перестраиваемых эталонов Фабри—Перо и эшелный спектрограф, рассчитанный на коронограф с полем зрения 5 угл. мин.

Коронографическая мода

В коронографической моде, ход лучей для которой показан на рис. 5, для устранения рассеянного света от опор, на которых крепится вторичное зеркало М2, и от самого узла этого зеркала предполагается использование специальной диафрагмы диаметром

700 мм, пропускающей свет только на один из сегментов главного зеркала, смещенного с оптической оси на 1100 мм (рис. 6). Свет от Солнца и короны падает на диафрагму через люк соответствующего размера в куполе. В этом режиме телескоп будет наводиться на область вне солнечного лимба на расстоянии около $1.3R_{\odot}$ от центра диска, чтобы поле зрения охватывало области внутренней короны на расстояниях $(0.1\div 0.3)R_{\odot}$ от лимба. Фильтрограммы и спектрограммы в фокусе Несмита будут получаться в эмиссионных линиях короны в диапазоне длин волн 0.4–1.5 мкм. В фокусе главного зеркала вместо теплоотводящей диафрагмы (heat-stop) устанавливается узел, содержащий охлаждаемую искусственную луну в виде отражающего свет зеркала и диафрагму Лео. Вторичное зеркало при этом строит вблизи фокальной плоскости изображение входного зрачка, в котором и устанавливается диафрагма Лео. При этом очень высокие требования предъявляются к конструкции элементов в первичном фокусе и качеству поверхности коронографического сегмента главного зеркала.

Уменьшение светосилы в режиме коронографа до 1:28.6 делает качество изображения дифракционно-ограниченным по всему полю зрения $2\omega = 5$ угл. мин. Как было отмечено в предыдущем разделе, поскольку в коронографической моде основным инструментом будет эшелный спектрограф с дифракционными диспергирующими элементами, рассчитанный на диапазон от зеленой корональной линии 0.53 мкм до магниточувствительных линий ближнего ИК-диапазона 1.5 мкм, важным фактором становится качество изображения в камерной системе спектрографа.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕДПОЛАГАЕМОМ НАУЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Понятно, что оснащение уникального инструмента, такого как КСТ-3, современным научным оборудованием является важнейшей задачей. Только при сочетании высоких оптических характеристик телескопа и параметров спектрального и фильтрового оборудования, а также фотодетекторов возможно получение интересных научных результатов. Практика современного солнечного приборостроения показывает, что необходимо как минимум следующее оборудование: компактный спектрограф и фильтрографы различного назначения в фокусе Несмита; дифракционный спектрограф полного поля и компактный спектрограф-спектрополяриметр, расположенные в фокусе куде на вращающейся платформе, обеспечивающей компенсацию вращения изображения. На этой же платформе размещаются фильтрограф на основе эталонов Фабри—Перо и широкополосный фильтрограф. Кроме того, для наведения основного телескопа могут быть использованы вспомогательные телескопы-гиды. Все научное оборудование и сам телескоп управляются единой автоматизированной системой управления (АСУ).

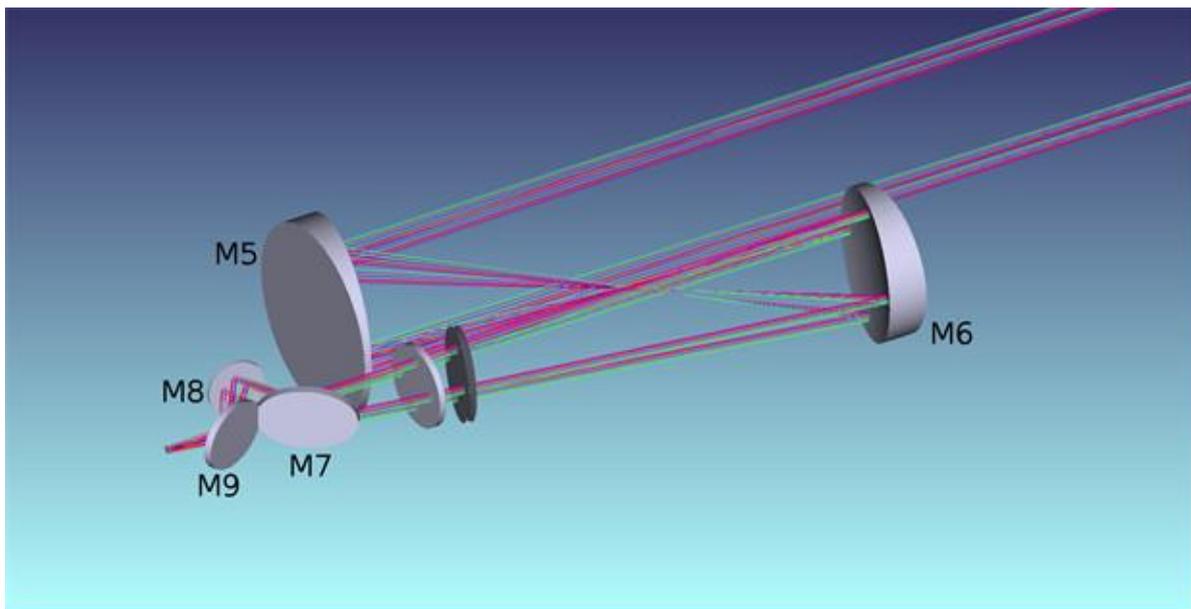
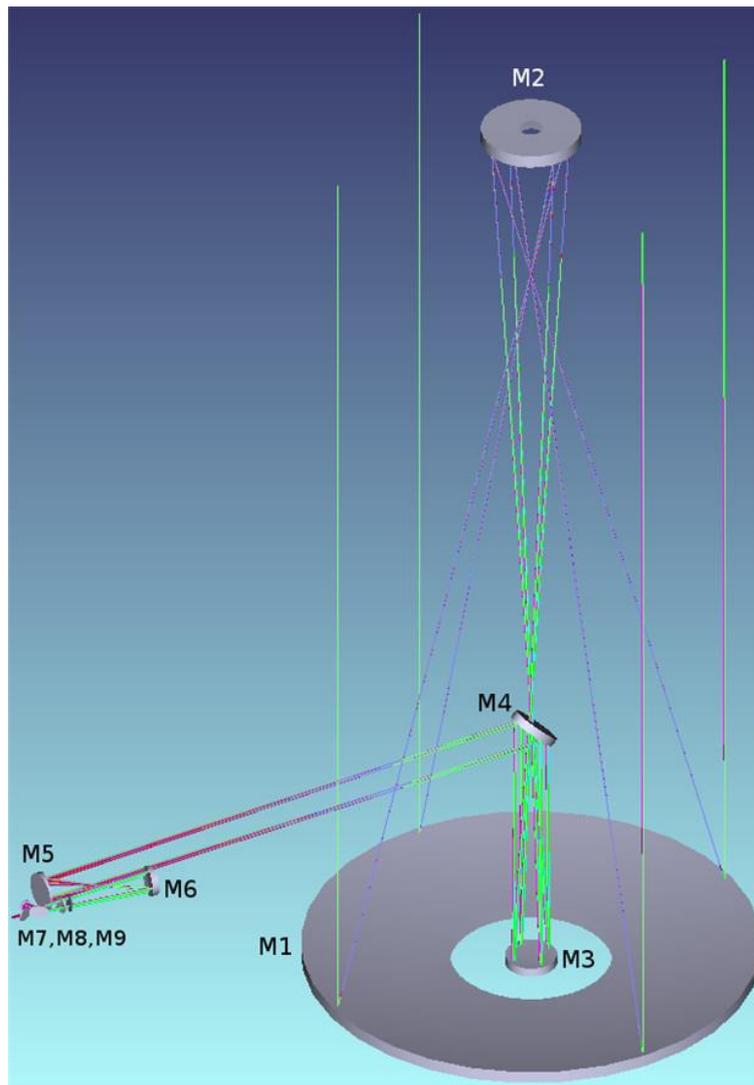


Рис. 3. Вариант оптической схемы Несмита с фокусным расстоянием 20 м: сверху — общий вид, внизу — область зеркал M5, M6

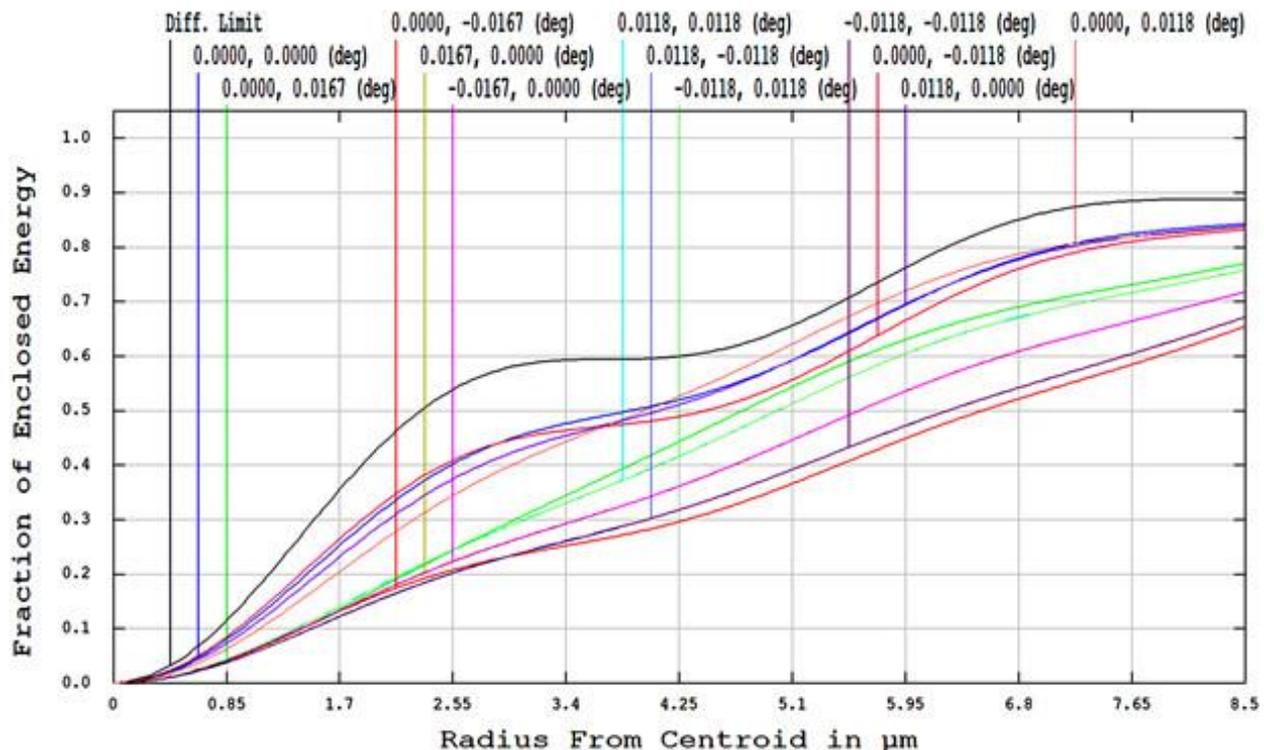
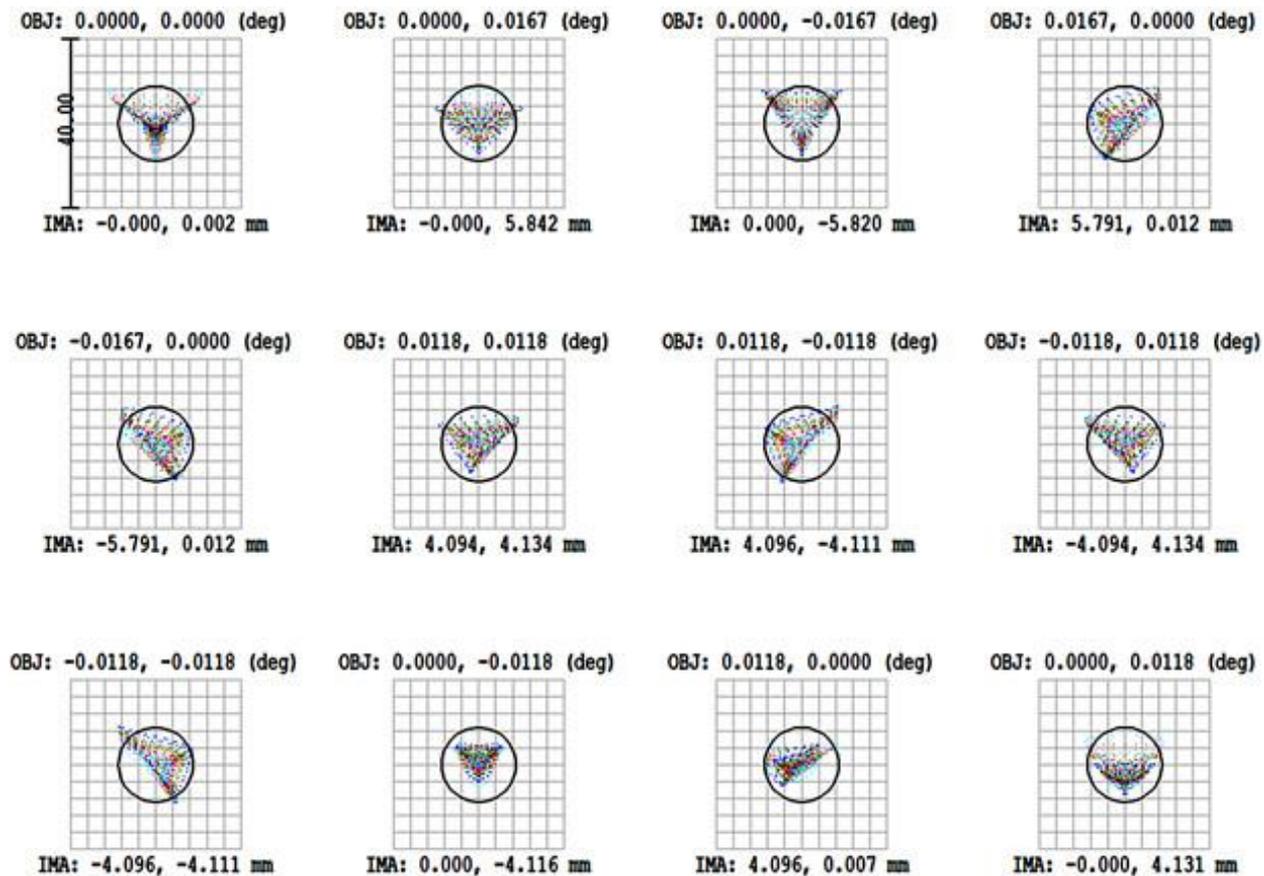


Рис. 4. Геометрические aberrации (вверху) и график концентрации энергии для оптической схемы КСТ-3 с фокусным расстоянием 20 м в фокальной плоскости Несмита

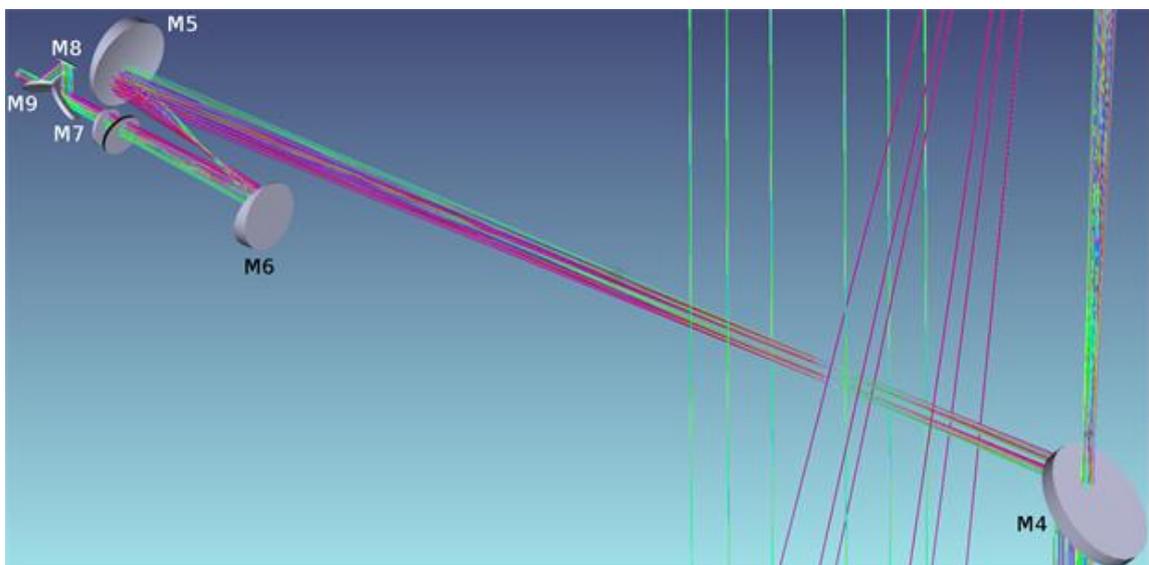
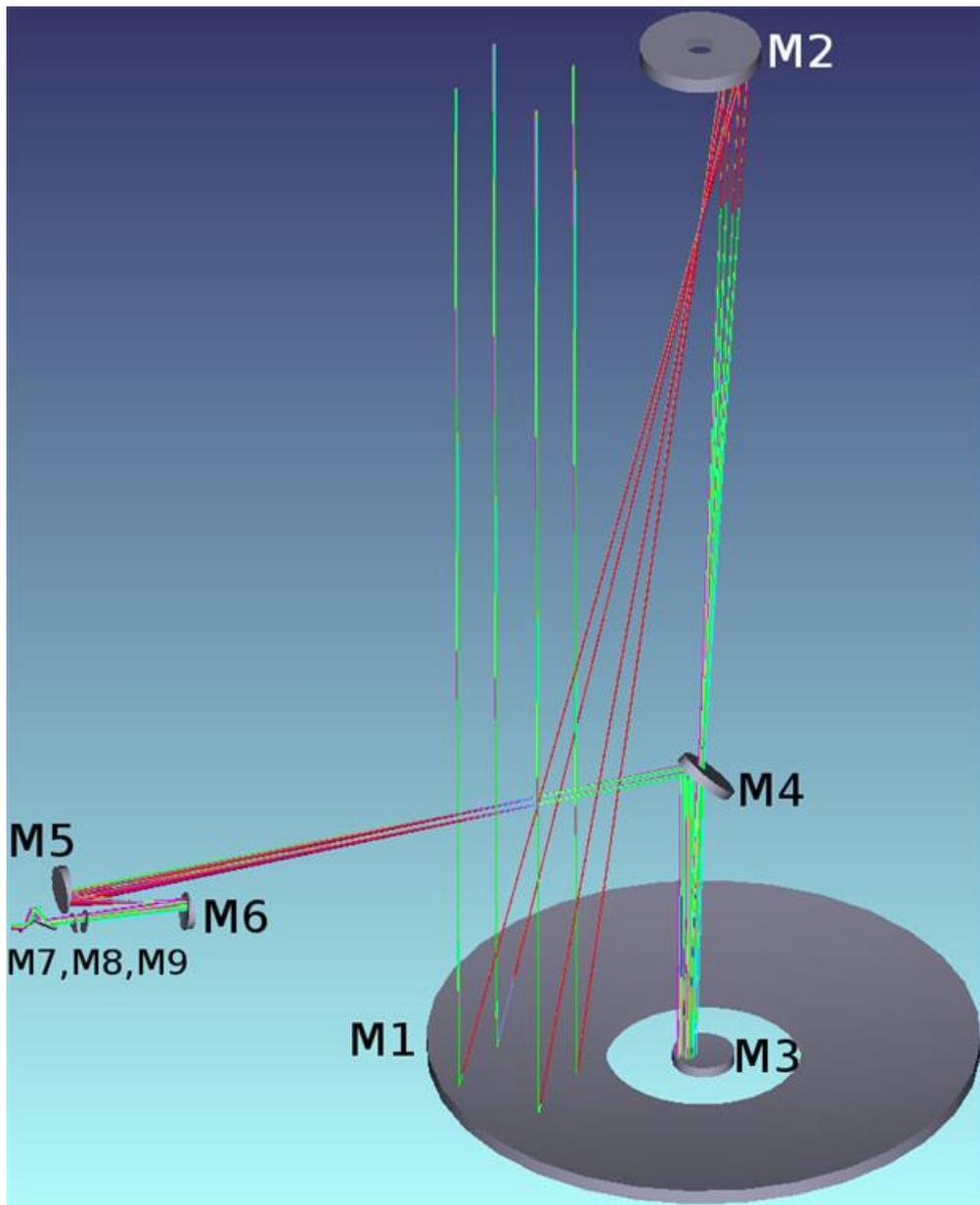


Рис. 5. Оптическая схема КСТ-3 в коронографической моде

Компактный спектрограф в фокусе Несмита

Спектрограф предназначен для наблюдений Солнца, а в ночное время — других астрофизических объектов. Для минимизации поляризационных и других эффектов он размещается на платформе Несмита. Отличительной особенностью данного прибора является большая по сравнению с другими научными приборами КСТ-3 угловая апертура. С его помощью предполагается проводить в основном стоксометрические измерения магнитных полей на Солнце. Прибор должен иметь возможность быстрой перестройки для наблюдений в разных спектральных линиях в широком диапазоне длин волн. Таким прибором является автоколлимационный спектрограф системы Литтрова внеосевой конфигурации. Высота щели должна быть не менее размеров изображения участка Солнца, создаваемого объективом телескопа и перестраивающей оптикой платформы Несмита. Спектр проецируется на матричный фотоприемник 1024×512 пикселей или более (размер пикселя 16×16 мкм). Параметры фотоприемника могут уточняться на этапе проектирования и создания спектрографа. Спектральное разрешение прибора не менее 0.02 Å в области спектра 500–900 нм и не менее 0.1 Å в остальной области. Для сканирования спектра предусмотрен разворот дифракционной решетки на вычисленные углы механизмом быстрого перехода по участкам спектра и точной подстройки на определенные спектральные линии. Из-за малых световых потоков для наблюдений звезд предусматривается замена дифракционной решетки на другую (возможно голографическую), работающую при меньших углах дифракции и обеспечивающую дисперсию около 1 Å/мм. Перед входной щелью спектрографа необходимо установить оптический компонент для размещения сменных интерференционных светофильтров. Параллельный ход лучей, падающих на дифракционную решетку, осуществляется подвижкой автоколлимационного зеркала. Предусмотрена возможность фокусировки изображения спектра посредством смещения узла фотоприемника. Основными рабочими линиями являются 5250, 6302, 8540, 10830 Å. Спектрограф должен обеспечивать одновременную регистрацию профилей Стокса в нескольких спектральных линиях вблизи указанных линий в диапазоне длин волн порядка 10 Å. Фокусное расстояние внеосевого автоколлимационного зеркала 1.7–2.3 м. Параметры дифракционной решетки в режиме наблюдений Солнца: число штрихов/мм (N) × порядок (K) — не менее 3000; углы дифракции должны быть в пределах от 40° до 60°; размер заштрихованной части не менее 200×300 мм. Параметры дифракционной решетки для звездных наблюдений будут уточнены в дальнейшем.

Спектрограф выполнен в виде отдельного законченного модуля, корпус которого состоит из блока дифракционной решетки, корпуса трубы, коллиматорного зеркала в оправе. Габаритная оптическая схема спектрографа согласована со схемой КСТ-3. Спектро-

граф оборудован системой получения изображения со щели (slit-jaw) для контроля фокусировки изображения и координат наблюдаемой области Солнца.

Дифракционный спектрограф с модулем интегрального поля в фокусе куде

Данный прибор — один из основных инструментов КСТ-3. Он отличается от классического однощелевого спектрографа тем, что с его помощью можно проводить одновременные наблюдения двумерного поля зрения, преобразуемого с помощью специального устройства (Integral Field Unit (IFU)) в набор длинных щелей, которые затем регистрируются одним фотоприемником, или мозаикой ПЗС-матриц. За основу делителя изображения может быть взято устройство MuSiCa для спектрографа EST с той разницей, что поляризационный анализ в нашем случае будет проводиться перед зеркалом МЗ. При этом имеется возможность преобразования спектрографа в обычный однощелевой с длинной щелью, сравнимой с полем зрения телескопа.

Для наблюдений различных слоев солнечной атмосферы спектрограф одновременно регистрирует излучение в разных спектральных линиях. При этом используются три канала, в каждом из которых возможна одновременная регистрация как минимум двух спектральных линий из разных порядков дифракционной решетки двумя видеокамерами. Каждый из каналов оптимизирован для работы в своем диапазоне длин волн и содержит отдельный диспергирующий элемент.

Приоритетная задача КСТ-3 — получение спектрограмм с максимальным пространственным разрешением 0.1" — может быть решена при достаточно малом поле зрения около 6×12 угл. сек. Однако желательно иметь несколько режимов работы с разными полями зрения и разрешением, поэтому наряду с высоким пространственным разрешением (поле зрения 6"×12", разрешение ~0.1") предусмотрен режим с умеренным пространственным разрешением ~0.3" (поле зрения ~18×36 угл. сек) и режим с большим полем зрения 42×84 угл. сек, но с низким пространственным разрешением. Смена режимов должна происходить без заметного ухудшения спектрального разрешения.

Предполагается, что спектрограф должен быть снабжен автономной сканирующей системой, осуществляющей последовательную регистрацию всех участков поля зрения телескопа. Механика должна обеспечивать такую скорость сканирования, при которой при максимальном разрешении все поле зрения телескопа может быть просканировано за время не более 50 с.

Требования по пространственному и спектральному разрешению, а также полю зрения определяют требования к фотоприемнику. Предполагается, что пиксель фотоприемника имеет квадратную форму. Размер пикселя для фотоприемника видимого диапазона равен 10 мкм, для фотоприемника инфракрасного диапазона — 20 мкм. Вероятно, потребу-

ется фотоприемник с числом пикселей $4K \times 4K$ и более. Частота считывания, определяемая параметрами работы анализатора поляризации, должна быть не менее 30 Гц.

Компактный спектрограф с эшелле-решеткой

Данный спектрограф, как и предыдущий, устанавливается в фокусе куде, но построен на основе автоколлимационной схемы и имеет минимальное количество оптических элементов. Спектрограф монтируется на оптическом столе-скамье. Он предназначен преимущественно для оперативных спектрополяриметрических наблюдений Солнца с высоким пространственным и временным разрешением. Поле зрения прибора должно охватывать значительную часть поля зрения телескопа, порядка $84''$ – $120''$ при разрешении $0.1''$ ($0.025''$ на 1 пиксель фотоприемника). Ширина щели может варьировать до $1''$. Поле зрения по длине волны зависит от модели фотоприемника и должно быть не менее 15 – 20 \AA . Сканирующая система перемещает скамью со спектрографом с механической точностью не хуже $0.025''$ (точность сканирования в реальности должна определяться качеством изображения). Прибор снабжен видеосистемой получения изображения со щели в разных длинах волн в широком спектральном диапазоне. Такая видеосистема должна обеспечивать те же характеристики по пространственному и временному разрешению, что и сам спектрограф. Это позволит определять положение щели на солнечном диске в разных длинах волн. Для этой цели предлагается использовать широкополосный фильтрограф (ШПФ).

Широкополосный фильтрограф

Широкополосный фильтрограф (ШПФ), устанавливаемый в фокусе куде на вращающейся платформе, предназначен для получения изображений солнечной поверхности с высоким пространственным и временным разрешением в нескольких длинах волн. С его помощью будут решаться задачи исследования динамики явлений, связанных с магнитными элементами в солнечной атмосфере, хромосферной динамики, структурных элементов солнечных пятен, а также быстрых вспышечных процессов. Еще одна задача ШПФ — обеспечение возможности восстановления изображений различными математическими методами, что должно приводить к преодолению предела качества, даваемого АОС КСТ-3. Для этого ШПФ должен получать серии изображений с максимальной каденцией (короткие экспозиции), что возможно при работе в сравнительно широкой полосе пропускания.

ШПФ представляет собой двухканальный прибор, где каждый канал содержит набор монохроматических интерференционных фильтров (ИФ) для синего и красного диапазонов спектра. В качестве рабочих спектральных линий предполагаются следующие: в синем канале — К CaII (3933 \AA), G полоса (4305 \AA), континуум в синей области спектра (4320 \AA),

H β 4861 \AA , континуум в зеленой области спектра (5550 \AA); в красном канале — континуум в красной области спектра (6540 \AA), Na 6563 \AA , TiO 7058 \AA , HeI 10830 \AA . Деление по каналам обеспечивается отражением или пропусканием света через светоделительный элемент, а также использованием света, отраженного от входной щели спектральных приборов. Два спектральных канала ШПФ работают или одновременно, или поочередно в зависимости от выбора участка спектра для исследований на ШПФ и спектральных приборах при их совместной работе с ШПФ. ШПФ снабжен системами автоматической замены интерференционных фильтров, регистрации изображений с программным обеспечением для обработки изображений *post facto*. Программные и аппаратные средства должны обеспечивать обработку данных в реальном времени с расчетом, что наблюдатель получит результат не позже чем через 10 с после получения изображения в каждом из каналов. Результат используется наблюдателем для коррекции программы наблюдений на других инструментах КСТ-3.

Каждый из каналов может получать изображения Солнца как минимум в четырех длинах волн поочередно. Для работы ШПФ должны использоваться быстро наклоняемое зеркало (*tip-tilt*) и АОС КСТ-3 с целью компенсации атмосферных помех. Фильтрограф монтируется на оптическом столе-скамье с независимым креплением всех оптических элементов. Каждый канал обеспечивает получение серий изображений с короткой экспозицией в течение 5 – 15 с в зависимости от режима работы. Смена фильтра в турели и соответствующие подстройки должны происходить не более 350 мс (цель — 250 мс). Общее время получения, обработки данных и представления результата пользователю должно быть не больше 10 с в каждом канале. Получение данных для одной длины волны без обработки ~ 1 с.

Прибор имеет поле зрения 2 угл. мин при разрешении, соответствующем дифракционному пределу оптики телескопа. Для обеспечения требуемого поля зрения светофильтры должны иметь максимальный диаметр не менее 62 мм (чистая апертура). Интерференционные фильтры в обоих каналах должны быть установлены или в телецентрических лучах, или в параллельном пучке вблизи изображения зрачка. Фокусировка системы может осуществляться автоматически подвижкой одного из перекидывающих объективов с помощью корреляционного трекера от дополнительной камеры по сравнительно небольшому участку изображения от светоделителя. Для максимального охвата поля зрения необходима современная научная CCD- или CMOS-камера (30 кадров/с и более) с размером кадра не менее $4K \times 4K$ пикселей.

Сканирование камерой в фокальной плоскости возможно, если из-за малого размера фотоприемника происходит ограничение поля зрения. Кусочки изображения могут быть программно сшиты. В этом случае должны быть уточнены требования по быстродействию системы. Для методов спекл-восстановления необходима серия изображений не менее чем из восьмидесяти кадров, полученных с короткой экспозицией.

Узкополосный фильтрограф на основе эталонов Фабри—Перо

Узкополосный фильтрограф (УПФ) устанавливается в фокус куде и предназначен для получения изображений солнечного диска в нескольких длинах волн узкого спектрального диапазона для изучения тонкоструктурных элементов фотосферы и хромосферы. С помощью прибора можно будет получать двумерные карты доплеровской скорости, магнитного поля (стокс-поляриметрия) и интенсивности излучения и отслеживать поперечные движения с разрешением ~ 75 км и выше при поле зрения не менее 1×1 угл. мин.

Прибор состоит из двух каналов и позволяет одновременно наблюдать две спектральные линии, например фотосферную и хромосферную. При этом каждый канал имеет возможность перестройки в другую спектральную линию для проведения квази-одновременных наблюдений в 4–6 линиях. Каждый канал может быть оптимизирован для работы в зеленом и красном спектральных диапазонах и содержит три эталона Фабри—Перо большой апертуры для достижения максимальных характеристик.

Спектральный диапазон УПФ составляет 390–1600 нм (последнее значение может быть уточнено в последующем), спектральное разрешение составляет 180000–300000 в зависимости от спектрального диапазона и режимов работы. Интенсивность шумов менее 0.01 %, стабильность по длине волны лучше 0.1 мÅ за 1 ч. Поле зрения прибора не менее $1' \times 1'$ при максимальном пространственном и спектральном разрешении. Цель — достижение поля зрения $1.5' \times 1.5'$ и больше. Пространственное разрешение составляет порядка 0.05"–0.1" (0.025" и 0.05" на 1 пиксель, цель — на 2 пикселя) и зависит от режима для достижения компромисса между полем зрения, пространственным и спектральным разрешением.

В приборе будут использоваться эталоны Фабри—Перо с апертурой порядка 150–200 мм. Они устанавливаются в телецентрическом пучке в плоскости изображения для исключения вариаций полосы пропускания по полю зрения. Для выделения нужной полосы использовались как можно меньше дополнительных фильтров. Последние должны иметь сравнительно широкую полосу пропускания > 0.7 нм. Система должна обеспечивать максимальное пропускание светового потока (~ 50 %).

Для совместных наблюдений с ШПФ, а также для задач спекл-восстановления изображения УПФ снабжен каналом с широкополосными фильтрами, работающим с теми же временными и пространственными характеристиками, что и основные каналы.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Программное обеспечение (ПО) АСУ предназначено для контроля аппаратной части телескопа, проведения научных экспериментов, получения и обработки данных. Система состоит из следующих базовых систем: TCS (контроль механики и систем телескопа, а также научных инструментов), DAHS

(управление цифровыми видеокамерами, конвейеры для обработки и редукиции данных), OCS (высокоуровневое управление всей системой обсерватории). ПО АСУ отражает структуру управляемых аппаратных узлов с использованием объектно-ориентированного подхода. Поскольку КСТ-3 создается как инструмент с ресурсом работы 30–50 лет, для его соответствия современным требованиям экспериментальных задач физики Солнца необходима постоянная модернизация. Поэтому АСУ должна обеспечивать поддержку новых исполнительных устройств, новых алгоритмов работы подсистем и системы как целого. Цель состоит в том, чтобы решать эти задачи в рамках одной программной платформы на протяжении как минимум 25 лет.

Алгоритмы управления устройствами объединены в группы для исключения дублирования программного кода. Для этого используются принципы объектно-ориентированного программирования и разбиение ПО на относительно независимые друг от друга программные модули, на серверную и клиентскую части. В качестве базовой операционной системы предусмотрено использование SUSE Linux OpenSUSE, а при необходимости коммерческих версий SLES/SLED; применение других систем сведено к минимуму. На ряде терминальных устройств для взаимодействия с пользователем допустимо применение систем Google Android, систем семейства Microsoft Windows и др.; в системе получения данных допустимо частичное применение систем семейства Microsoft Windows.

В системе использованы специальные устройства — аппаратные контроллеры (далее просто контроллеры) для управления приводами, датчиками с целью обеспечения алгоритмов низкого и высокого уровней. В явном виде должны быть выделены интерфейсы для управления устройствами и/или подсистемами. Особенно это касается случаев, когда контроллер обеспечивает работу не одного исполнительного устройства, а группы исполнительных устройств.

Важно отметить, что при разработке АСУ КСТ-3 будет использован богатый предыдущий опыт создания АСУ солнечных телескопов ИСЗФ СО РАН.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ТЕХНИЧЕСКОМ ЗДАНИИ КСТ-3

Общий архитектурный облик разрабатываемого комплекса КСТ-3 представлен на рис. 7. Комплекс состоит из четырех основных блоков. Первый блок — башня для установки телескопа и купола. Во втором блоке устанавливается инженерное оборудование, необходимое для обеспечения работы телескопа и купола, а также грузовой лифт для транспортировки узла главного зеркала и других крупных узлов телескопа. Третий блок — технический корпус, где расположен зал сборки с помещениями для установки нанесения отражающих покрытий, мастерской, кладовой для инструмента. Четвертый блок имеет лабораторно-административное назначение. В нем расположено оборудование для юстировки оптомеханических узлов, чистая комната с оптической скамьей, лаборатория по разработке и ремонту электронных компонентов. В этом же блоке

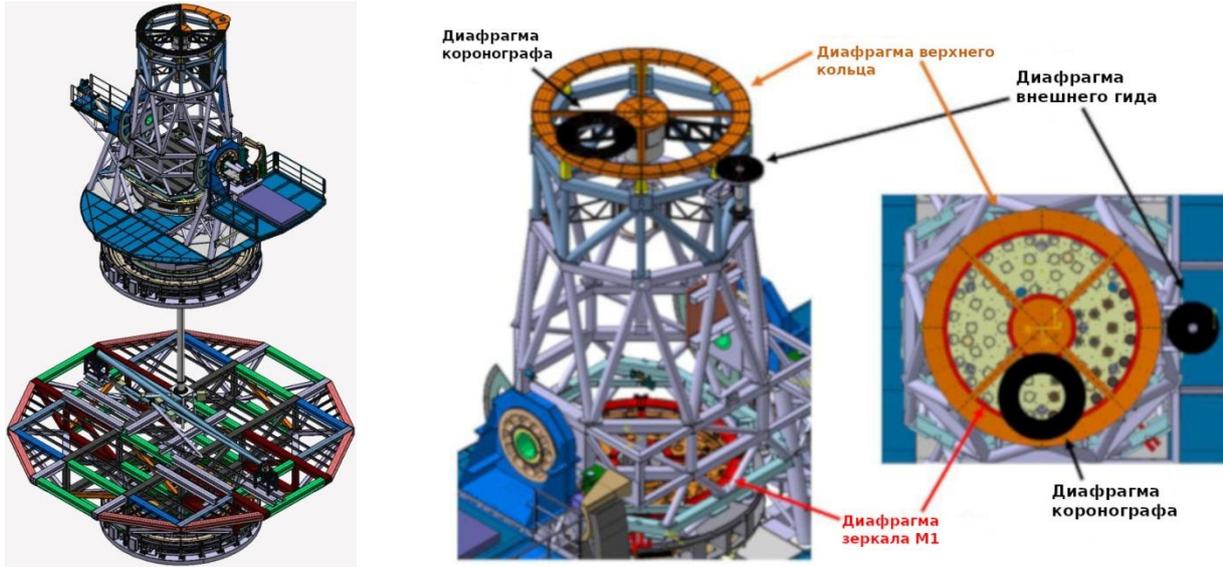


Рис. 6. Предварительный вид КСТ-3 в нормальной (слева) и коронографической модах

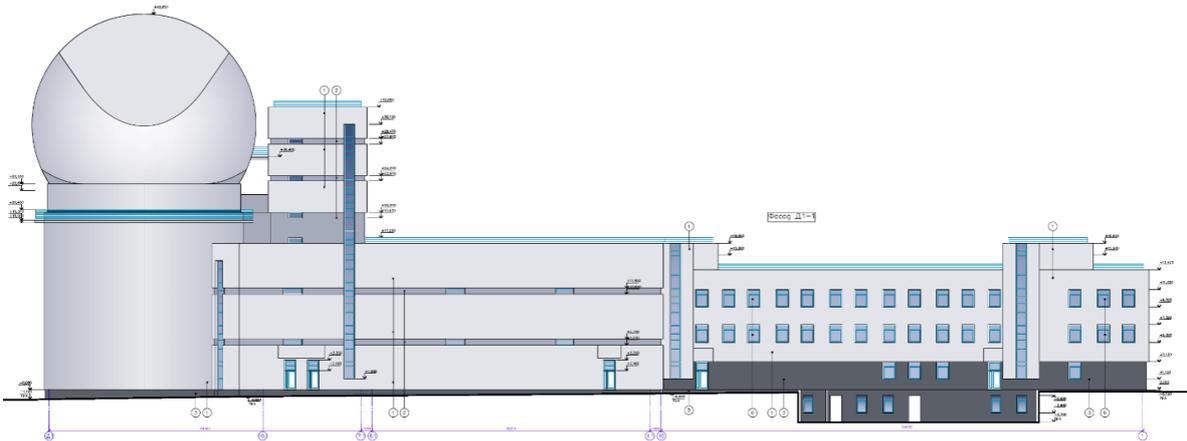


Рис. 7. Общий вид зданий КСТ-3. Слева направо: башня, здание башни, технический корпус, лабораторно-административный блок

расположены бытовые помещения для проживания персонала. Тепло, производимое всеми системами и оборудованием, отводится с помощью вентиляционных шахт на северной стороне здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные варианты оптических схем могут быть базовыми для разработки решений, удовлетворяющих исходным геометрическим параметрам трехзеркальной системы с малым диаметром зеркала M2 и относительным отверстием зеркала M1 1:2. Внеосевые зеркала перестраивающей системы изготавливаются по отработанным в настоящее время технологиям российскими и зарубежными производителями. Качество коррекции aberrаций в рабочем поле зрения является дифракционным и допускает возможность упрощения оптической схемы, в частности, замену зеркала M3 на параболическое для всех рассмотренных вариантов. При этом для перехода к различным фокусным расстояниям его замена

не потребуется, что упрощает процесс эксплуатации. Более того, вполне допустим, по нашему мнению, вариант применения в качестве вторичных перестраивающих трехзеркальных систем с заменой зеркала M3 на сферическое. В этом случае система может быть анастигматом, а сохранение телецентричности благодаря введению дополнительной силовой поверхности может сочетаться с возможностью изменения фокусного расстояния системы в известных пределах.

Необходимо отметить, что в данной работе приведены только основные характеристики нового телескопа, детальная разработка рабочей документации — многосложная задача, рассчитанная на несколько лет. С большой вероятностью, основная часть проектных работ будет выполняться известной бельгийской фирмой AMOS (Advanced Mechanical and Optical Systems), имеющей богатый опыт разработки и создания крупных астрономических телескопов, включая солнечные. Специалисты данной фирмы уже принимали участие в разработке эскизного проекта КСТ-3.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Григорьев В.М., Папушев П.Г., Скоморовский В.И., Чупраков С.А. Трехметровый солнечный телескоп-коронграф необходим солнечным физикам России // Всероссийская астрономическая конференция: Тезисы. Санкт-Петербург, 6–12 августа 2001 г. 2001. С. 53.

Grigor'ev V., Pimenov Y., Papushev P., et al. Proposal Large Solar Telescope in Russia // 26th Meeting of the IAU. Special Session "Astronomical Facilities of the Next Decade" Czech Republic, Prague, 16–17 August, 2006. 2006. SPS1, id 19.

Liu Z., Deng Y., Ji H. The Chinese Giant Solar Telescope // Proc. the International Astronomical Union. 2013. V. 8 (S300). P. 349–354. DOI: [10.1017/S1743921313011186](https://doi.org/10.1017/S1743921313011186).

McMullina J.P., Rimmelea T.R., Keila S.L., et al. The Advanced Technology Solar Telescope: Design and Early Construction // Proc. SPIE. 2013. V. 8444, N. 7. P. 1–12.

Rimmele T.R., Wagner J., Keil S., et al. The Advanced Technology Solar Telescope: beginning construction of the world's largest solar telescope // Proc. SPIE. 2010. V. 7733. P. 1–12.

Sánchez-Capuchino J., Collados M., Soltau D., et al. Current concept for the 4m European Solar Telescope (EST) optical design // Proc. SPIE. 2010. V. 7733, N. 36. P. 1–8.

REFERENCES

Grigoryev V.M., Papushev P.G., Skomorovsky V.I., Chuprakov S.A. Three-meter solar telescope-coronagraph required for Russian solar physicists. *Russian National Astronomical Conference: Abstracts*. Saint-Petersburg, August 6–12, 2001. 2001, p. 53. (In Russian).

Grigor'ev V., Pimenov Y., Papushev P., Skomorovsky V., Kamus S. Proposal Large Solar Telescope in Russia. 26th Meeting of the IAU. Special Session "Astronomical Facilities of the Next Decade". Czech Republic, Prague, 16–17 August, 2006. 2006, SPS1, id 19.

Liu Z., Deng Y., Ji H. The Chinese Giant Solar Telescope. *Proc. the International Astronomical Union*. 2013, vol. 8 (S300), pp. 349–354. DOI: [10.1017/S1743921313011186](https://doi.org/10.1017/S1743921313011186).

McMullina J.P., Rimmelea T.R., Keila S.L., Warner M., Bardena S., Bulaua S., et al. The Advanced Technology Solar Telescope: Design and Early Construction. *Proc. SPIE*. 2013, vol. 8444, no. 7, pp. 1–12.

Rimmele T.R., Wagner J., Keil S., Elmore D., Hubbard R., Hansen E., Warner M., et al. The Advanced Technology Solar Telescope: beginning construction of the world's largest solar telescope. *Proc. SPIE*. 2010, vol. 7733, pp. 1–12.

Sánchez-Capuchino J., Collados M., Soltau D., López R., Rasilla J.L., Gelly B. Current concept for the 4m European Solar Telescope (EST) optical design. *Proc. SPIE*. 2010, vol. 7733, no. 36, pp. 1–8.

Как цитировать эту статью:

Григорьев В.М., Демидов М.Л., Колобов Д.Ю., Пуляев В.А., Скоморовский В.И., Чупраков С.А., команда AMOS. Проект Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 19–36. DOI: [10.12737/szf-62202002](https://doi.org/10.12737/szf-62202002).