

УДК 520.24

**Комплексе крупного универсального солнечного телескопа.
Требования и пути реализации**

В. Н. Карпинский, Н. Н. Михельсон, М. А. Соснина

Крупный перспективный фотосферно-хромосферный телескоп должен давать разрешение $0.5-0.25''$ с возможностью достижения $0.1''$, допускать слежение не хуже $1''$, иметь малую инструментальную поляризацию ($10^{-3}-10^{-5}$). Предлагается наводящийся на Солнце телескоп диаметром около 2 м с открытым (без вакуума и заполнения гелием) коротким (менее 10 м) ходом лучей большой апертуры по трехзеркальной схеме Кассегрена—Грегори. Поляризационный анализатор помещается в кассегреновском фокусе. Неподвижность изображения достигается применением целостной системы на выходе после эллиптического зеркала.

THE SYSTEM OF BIG MULTIPURPOSE SOLAR TELESCOPE. REQUIREMENTS AND THE WAYS OF THEIR REALIZATION, by Karpinskiy V. N., Mikhel'son N. N., Sosnina M. A.—A perspective big photospheric-chromospheric solar telescope must be of $0.5-0.25''$ resolution (possibly up to $0.1''$), have a tracking power not worse than $1''$ and a small effect of instrumental polarization ($10^{-3}-10^{-5}$). The 2-m telescope proposed is automatically pointing to the Sun, operates with an open (without vacuum or helium pumping) short (less than 10 m) path of rays of large aperture on the three-mirror Cassegrain—Gregory scheme. Polarization analyser is set in the Cassegrain focus. The image stability is reached by using the coelostat system at the exit after the elliptical mirror.

Основой построения моделей всех солнечных структур [2, 3] являются систематические комплексные наблюдения пространственно-временных полей физических параметров в фотосфере и хромосфере Солнца (температуры, скорости, плотности, магнитного вектора) с высоким разрешением: пространственным (в картинной плоскости и по лучу зрения), параметрическим и временным. В этой задаче важна также диагностика характера неоднородностей внутри объемов, остающихся неразрешенными (сверхтонкая структура), и особенно неоднородностей магнитного поля. Это требует точного измерения параметров Стокса и предъявляет жесткие требования к инструментальной поляризации. Мы исходим из предпосылки, что соответствующие целенаправленные наблюдения, начинающиеся только сейчас, не потеряют своей актуальности и будут развиваться в будущем.

Сформулируем основные требования к инструменту, предназначенному для указанных целей:

Особо важные. 1. Разрешение: инструмент должен давать пространственное разрешение не хуже $0.1''$ и обеспечивать возможность получения снимков и спектрограмм с разрешением $0.5-0.25''$ достаточно часто; 2. Слежение: отслеживание деталей на солнечной поверхности с точностью не хуже $1''$ в продолжение нескольких часов наблюдения; 3. Поляризация: влияние инструментальной поляризации мало (эффективные величины $10^{-3}-10^{-4}$ для линейной и $10^{-4}-10^{-5}$ для эллиптической поляризации); 4. Перспективность: возможность непрерывного улучшения и развития телескопа в процессе его эксплуатации на протяжении не менее 50 лет; 5. Универсальность специализация: решение разных задач в рамках поставленной общей научной задачи (многопрограммность).

Главные. 1. Рассеянный свет: менее 1—5% средней яркости фотосферы для солнечного пятна с размером ядра $10''$ (инструментальный и в атмосфере); 2. Эффективность: возможность исследования солнечных явлений одновременно разными средствами и способами, быстрая смена наблюдательных программ, достаточная информационная пропускная способность, высокая надежность, удобство проведе-

ния наблюдений; 3. Экономичность: снижение объема и стоимости работ по созданию комплекса и его эксплуатации при удовлетворении основных требований; 4. Фокусное расстояние: эквивалентные рабочие фокусные расстояния должны составлять 60, 120 и 240 м.

Дополнительные. 1. Поле зрения: не менее $200''$; 2. Неподвижность изображения Солнца в рабочем фокусе и отсутствие его вращения; 3. Ветер со скоростью до 10—15 м/с не должен снижать точность слежения; 4. Длина хода лучей

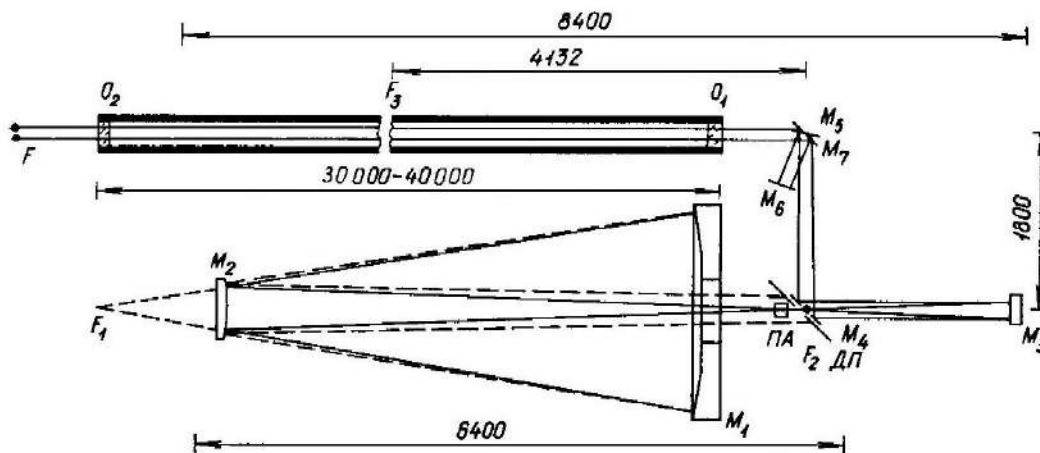


Рис. 1. Оптическая схема телескопа для варианта параллактической монтировки. Зеркало: M_1 — главное; M_2 — вторичное; M_3 — третье

большой апертуры должна быть возможно меньшей (или открытого типа); 5. Укрытие от атмосферных воздействий должно быть эффективным; 6. Искажения изображения, возникающие внутри телескопа, должны быть сведены к минимуму.

Наиболее важным и дискуссионным представляется достижение требуемого эффективного высокого разрешения. В настоящее время достигнут предел разрешения $0.25''$ [4—6]. Возможности повышения разрешения при наземных наблюдениях не исчерпаны, и развитие здесь идет достаточно быстро (спекл-интерферометрия, адаптивная оптика, коррекция и др.). Решающее значение имеет удачный выбор места установки инструмента [7].

Предлагаются следующие исходные характеристики и принципы для такого инструмента [1—3]: 1 — диаметр входного зрачка около 2 м; 2 — пучки большой апертуры распространяются в воздухе (без входного окна и замкнутого объема, вакуумированного или наполненного гелием). Для снижения искажения длина хода лучей делается как можно меньше и устраняются источники воздушных неоднородностей в телескопе; 3 — слежение за Солнцем проводится всем телескопом, а не целостно-сидеростатной системой на входе; 4 — наличие прямого (без косых отражений) фокуса с постоянной, малой и простой инструментальной поляризацией для помещения поляризационного анализатора; 5 — неподвижное невращающееся изображение Солнца создается целостной системой на выходе после кассегреновского фокуса. Проект варианта «открытого» крупного Европейского солнечного телескопа без купола с ферменной конструкцией рассматривался в работе [8].

Требуемым условиям соответствует трехзеркальная схема Кассегрена — Грегори с параболическим главным зеркалом ($D=2$ м, $A=1:3$), предфокальным гиперболическим вторичным зеркалом и эллипсоидальным третьим за вторичным фокусом [2]. От ранее предлагавшейся схемы Грегори [3] она выгодно отличается меньшей длиной инструмента и тем, что диафрагма, ограничивающая поле зрения, перенесена из первичного фокуса ($A=1:3$) во вторичный ($A=1:13$), где плотность энергии более чем на порядок ниже.

Оптическая схема телескопа для варианта параллактической монтировки приведена на рис. 1, а его основные габаритные величины — в табл. 1. От M_1 до M_6 плоскость чертежа соответствует плоскости небесного экватора для склонения Солнца, равного нулю. ПА — поляризационный анализатор, помещенный вблизи кассегреновского фокуса, где инструментальная поляризация неизменна, мала по величине и осесимметрична. Инструментальная поляризация, возникающая после анализатора, не существенна. ДП — диафрагма, ограничивающая поле и снижающая «тепловую нагрузку» на

стоящие за ней оптические элементы. Целостатное зеркало M_5 , вращающееся со скоростью 1 оборот за 48 ч, обеспечивает неподвижный и невращающийся отраженный пучок, который зеркалами M_6 и M_7 направляется в полярную ось, а затем в перебрасывающую систему, составляющую продолжение полярной оси или расположенную вертикально. Диаметр входных ее окон O_1 и O_2 может не превышать 200 мм. При необходимости подъема телескопа над землей на значительную высоту (20—40 м) для улучшения качества изображения и расположения рабочего фокуса вблизи земной поверхности перебрасывающая система может быть вакуумирована для снижения искажений на длинном пути лучей. При изменении склонения точки наведения телескопа на деталь происходит дополнительный поворот поля зрения по углу на величину разности

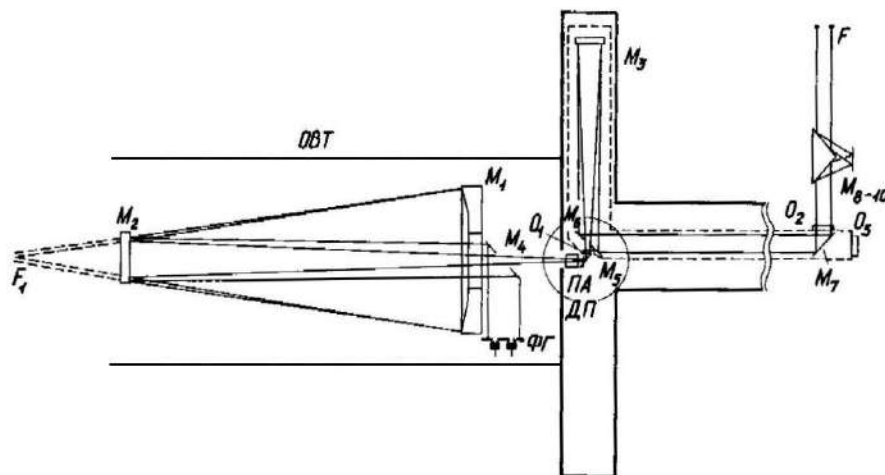


Рис. 2. Оптическая схема телескопа для альт-азимутального варианта

склонений. Тип выходного целостата требует доработки. На рисунках 2 и 3 представлена оптическая схема инструмента в альт-азимутальном варианте, а основные габаритные параметры приведены в табл. 2. На рис. 2 показаны элементы внешней конструкции, не связанные с монтажкой телескопа, так что их деформации не влияют на положение инструмента. Штриховыми линиями выделены стены световодного канала, который при необходимости может быть вакуумирован. ФГ — фотогид, на который зеркалом M_2 отбрасываются нерабочие участки диска Солнца. Смещение фотогида может использоваться при наведении телескопа, сканировании, а сигнал рассогласования — для стабилизации положения изображения. Отверстие в M_4 ограничивает световой поток, падающий на поляризационный анализатор (ПА). Рабочее поле диаметром около 200'' выделяется диафрагмой поля (ДП). Проходящий через нее на последующие оптические элементы световой поток примерно в 50 раз меньше, чем от всего диска Солнца, и не должен вызывать существенных нагревов и связанных с ними воздушных неоднородностей. Диагональное зеркало M_5 через входное окно O_1 ($D \approx 70$ мм) отбрасывает пучок на эллипсоидальное зеркало M_3 , которое и строит рабочее изображение на расстоянии 22 м от него при эквивалентном фокусном расстоянии 180 м; если рабочий фокус необходимо отнести на большее расстояние или для меньшего эквивалентного фокусного расстояния необходима дополнительная специальная перебрасывающая оптическая система. Пучок выводится из светового канала в сторону или вниз через окна O_2 , O_3 со световым диаметром 200 мм. Вращение изображения может компенсироваться поворотом зеркальной призмы Дове $M_8 - M_{10}$.

Таблица 1. Параметры телескопа для варианта параллактической монтировки, мм

Зеркало	Форма поверхности	s	s'	f'	$F_{\text{ЭКВ}}$	ν	$D_{\text{СВ}}$	$2\gamma'$
M_1	Вогнутый параболоид		6000	6000	6000	3	2000	4
M_2	Выпуклый гиперболоид	-1333	5700	1684	26 300	13	600	26
M_3	Вогнутый эллипсоид	-2000	-9132	1640	$120 \cdot 10^3$	60	300	120
$M_4 - M_7$	Плоские						300	
$O_1 - O_2$	Вакуумированная перебрасывающая система						200	

В работе [3] рассматривался проект полностью «открытого» телескопа, все элементы которого подвержены действию ветровой нагрузки, и был предложен комплекс мероприятий, обеспечивающий необходимую стабильность положения изображения в телескопе. Дополнительные возможности создаются стабилизацией положения изображения диафрагмы поля (ДП) в рабочем фокусе.

Башня телескопа (особенно сплошная) служит источником воздушных неоднородностей. Металлические конструкции предпочтительней железобетонных из-за меньшей тепловой инерции. Оптические помехи создаются также куполом телескопа. Предлагается, что их можно свести к минимуму, и защитить телескоп от ветровой нагрузки (возможно, и от восходящих потоков), поместив его в ветрозащитную тубус-трубу (ОВТ), открытую с обеих сторон и следящую вместе с телескопом за Солнцем, но не соприкасающуюся с телескопом. Площадь сечения, перпендикулярного направлению пучка лучей, идущего от Солнца, а следовательно, и нагрев тубуса в этом случае минимальны. ОВТ может быть снабжен крышками, надежно предохраняющими телескоп вместе с тубусом от вредных ат-

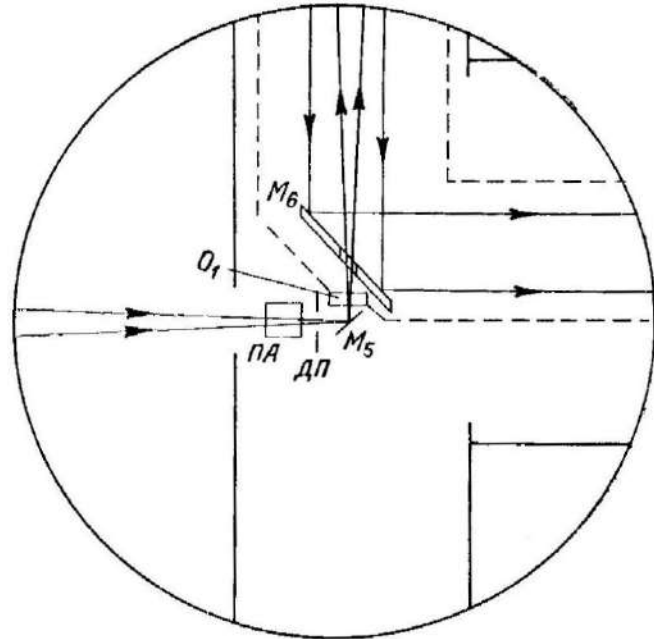


Рис. 3. Центральная часть оптической схемы

мосферных воздействий в нерабочем состоянии. ОВТ выполняет роль купола без присущих ему существенных недостатков. Ветрозащитная труба была применена в конструкции солнечного телескопа, установленного на Капри [9].

Проведенный Н. Н. Михельсоном и М. А. Сосниной сравнительный анализ оптических систем показал, что трехзеркальная схема Кассегрена—Грегори хорошо удовлетворяет сформулированным выше требованиям. Возникающая при децентрировке вторичного зеркала на ± 0.1 мм или наклоне его на $10''$ кома в центре поля составляет $0.07''$. Применение схемы Ричи—Кретьена здесь не оправдано. Можно использовать систему с главным зеркалом сферической формы. В этом случае вторичное зеркало становится сплюснутым сфероидом, а третье—гиперболоидом. Для устранения значительной сферической аберрации высших порядков необходима дополнительная ретушь на вторичном или третьем зеркалах. Во вторичном фокусе, где расположен анализатор, диаметр аберрационного кружка составит $2''$, что существенно больше дифракционного размера, но приемлемо. Целесообразность перехода к сферическому главному зеркалу требует дальнейшего анализа. В предложенной схеме возможно применение адаптивного корректора волнового фронта вблизи выходного зрачка после третьего зеркала.

Опыт наблюдений Солнца с высоким разрешением, накопленный в Пулковской обсерватории за последние 15 лет, свидетельствует о том, что в «открытом» инструмен-

Таблица 2. Параметры телескопа для альт-азимутального варианта, мм

Зер-кало	Форма поверхности	s	s'	f'	$F_{\text{экв}}$	ν	$D_{\text{св}}$	$2Y'$
M_1	Параболоид	—	6000	6000	6000	3	2000	6(60)
M_2	Гиперболоид	—1500	6120	1205	24 500	12	620*	24(245)
M_3	Эллипсоид	—3000	—22 000	2600	$180 \cdot 10^3$	90	280	180(1565)

Примечание. Звездочкой отмечена величина с учетом сканирования от края до края без виньетирования. В скобках приведен диаметр всего изображения Солнца.

те с коротким ходом лучей большой апертуры ограничение разрешения определяется в основном неоднородностями в атмосфере вне телескопа [4—6]. При этом еще не все возможности снижения инструментальных искажений были реализованы. Поэтому широко распространенная концепция полностью вакуумированного или наполненного гелием телескопа [1] представляется нам не оправданной. Тем более что в схеме такого телескопа появляется дополнительный источник помех — входное окно диаметром около 2 м, которое не должно вносить искажений. Изготовление такого окна находится на грани возможностей современной техники и приводит к существенному удорожанию инструмента. Использование целостатно-сидеростатной системы большого диаметра на входе и одиночного длиннофокусного зеркала приводит к неоправданно большим габаритам и значительной, изменяющейся во времени, инструментальной поляризации. Эффективность эксплуатации телескопа будет в большой степени определяться удачным выбором пункта для его установки. От широты, характера рельефа и подстилающей поверхности и др. зависят многие особенности конструкции инструмента (высота башни, характер защиты от потоков с грунта и др.). Достаточно надежная оценка астроклимата требует наблюдений продолжительностью не менее одного года.

Общая эффективность работы комплекса будет определяться составом приемно-анализирующей и спектральной аппаратуры, а также соответствующими средствами автоматизации наблюдений и обработки информации.

В настоящей статье мы изложили лишь первые (вводные) результаты работы по проблеме создания большого универсального солнечного телескопа. Статья не охватывает всех аспектов этой большой и сложной проблемы. В дальнейшем будут исследованы оптические варианты, теплофизика и механика телескопа.

Авторы благодарят Х. Артуса, А. В. Брунса, В. Бумбу, В. М. Григорьеву, К. Пфлюга, В. Е. Степанова, Н. Н. Степанян, М. Штайнбаха за плодотворные дискуссии и полезные советы.

1. Григорьев В. М., Карпинский В. Н. Солнечные инструменты // Исслед. по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца.— 1981.— Вып. 56.— С. 57—75.
2. Карпинский В. Н. Большой солнечный телескоп высокого разрешения с невакуумированной оптикой // Солнечные инструменты: Тез. докл. к пленуму комиссии астрон. приборостроения.— Иркутск, 1979.— С. 7—9.
3. Карпинский В. Н. Каким должен быть крупный универсальный солнечный телескоп (КУСТ) // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулкове.— 1982.— № 200.— С. 135—139.
4. Карпинский В. Н., Костюкевич В. И. Фотографии фотосферы Солнца с высоким разрешением // Солнеч. данные.— 1971.— № 3.— С. 88—89.
5. Парфиненко Л. Д. Опыт высокогорных наблюдений Солнца // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулкове.— 1985.— № 203.— С. 68—74.
6. Парфиненко Л. Д., Михалев В. Ф. Опытные наблюдения Солнца с высоким разрешением на Памире // Солнеч. данные.— 1978.— № 8.— С. 92—97.
7. Bray R. J., Loughhead R. E., Durrant C. J. Solar Granulation.— 2-nd. ed.— Cambridge, 1984.— 35 p.
8. Hammerschlag R. H., Rutten R. J. An open LEST? // Osserv. e mem. Osserv. astrofis. Arcetri.— 1978.— Fasc. 106.— P. 115—118.
9. Kiepenheuer K. O. A domeless coude refractor for solar work // Appl. Opt.— 1964.— 3.— P. 1363—1364.

Глав. астрон. обсерватория АН СССР,
Пулково

Поступила в редакцию 21.03.86,
после доработки 29.10.86