

УДК 523.4

**А. П. Видьмаченко, Ю. С. Иванов, А. В. Мороженко,
Е. П. Неводовский, И. И. Синявский, М. Г. Сосонкин**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ
vida@mao.kiev.ua

Спектрополяриметр наземного супроводження космического эксперимента «Планетный мониторинг»

Надійшла до редакції 26.10.06

Планується виготовити спектрополяриметр для вимірювання лінійної поляризації випромінювання від небесних об'єктів в спектральному діапазоні $\lambda\lambda = 350\text{—}930$ нм. Спектрополяриметр матиме панорамний приймач випромінювання та конструктивні особливості, які дозволять мінімізувати кількість оптичних елементів та їхню товщину. Кожен оптичний елемент спектрополяриметра сконструйовано таким чином, щоб він здатен був реалізувати якомога більше індивідуальних функцій (пропускання світла, вимірювання поляризації, здійснення оптичної корекції світлового променя і т. п.) одночасно. Запропоновано виключити зі схеми спектрополяриметра елементи розкладання світла у спектр як окремі пристрій. Замість них використано призму Волластона унікальної конструкції. Вона складається із двох клинів зі сферичними бічними поверхнями, які мають зміщені центри кривизни. Ця ж призма Волластона виконує роль поляризаційної призми і дисперсійної системи. Така конструкція дозволить покращити пропускання світлового потоку у 3—10 разів.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение климата Земли требует использования космических аппаратов для мониторинга (то есть длительного систематического наблюдения и последующего анализа временных трендов) атмосферы и поверхности планеты. Принимая во внимание огромную продуктивность метода климатического мониторинга в изучении Земли, представляется целесообразным применение этого метода при исследовании климатических систем других планет. Решать подобные задачи с помощью индивидуальных космических аппаратов было бы слишком дорого, поскольку потребовалось бы множество специализированных спутников для каждой планеты с достаточно

продолжительным временем жизни. В то же время весьма скромные астрономические инструменты при подходящих условиях могли бы обеспечить наблюдения для решения ряда важных задач планетного мониторинга. К их числу принадлежит мониторинг переменных явлений на планетах Солнечной системы: марсианских пылевых бурь, сезонных изменений на поверхности Марса [3, 12], движения и изменения структуры облаков Венеры [11], Юпитера [8] и Сатурна [9], вековых изменений климата Марса [7], мало изученных явлений, но все же отмечавшихся наблюдателями кратковременных локальных вспышек на Венере [10] и Марсе, которые могут идентифицироваться с молниями или падениями метеоритных тел, и переменных

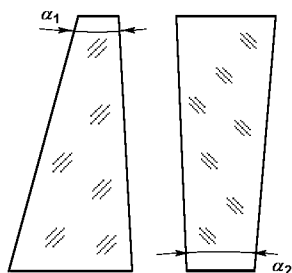


Рис. 1. Сочетание двух клиньев

явлений на других телах Солнечной системы (например кометах). Цель такого космического эксперимента (КЭ) состоит в долговременном мониторинге с борта орбитальной станции. Для этого на Международной космической станции (МКС) создается специализированная обсерватория, включающая телескоп умеренных размеров (диаметр главного зеркала 40 см с угловым разрешением до $0.3''$), платформа для его слежения и приемная аппаратура (ПЗС-камера и изображающие спектрометры, работающие в видимой, ближней ИК- и ближней УФ-областях спектра). Одним из четырех приборов, которыми планируется оснастить этот телескоп, является УФ-спектрометр-поляриметр (ПМ-СП) для диапазона спектра $\lambda\lambda = 230\text{—}390$ нм. Для расширения спектрального диапазона при анализе наблюдательных данных о телах Солнечной системы и для постоянного контроля за чувствительностью приемной аппаратуры ПМ-СП планируются параллельные наземные спектрополяриметрические наблюдения небесных тел в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 350\text{—}900$ нм. С этой целью в Главной астрономической обсерватории (ГАО) НАН Украины разработан и изготавливается спектрометр-поляриметр сопровождения (СПС) космического эксперимента «Планетный мониторинг» (ПМ).

РАСЧЕТ ДИСПЕРГИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

В качестве диспергирующей системы СПС было предложено использовать составную призмennую систему, элементы которой могут разме-

щаться в различных частях оптической системы и работать с разным угловым увеличением (рис. 1). Как известно, для приборов низкого и умеренного спектрального разрешения именно призмы являются наиболее предпочтительными диспергирующими элементами [2, 4]. Однако при использовании матричных приемников излишнее растягивание коротковолнового участка приведет к падению эффективности устройства в этой области [5, 6]. Поэтому один из авторов работы (Ю. С. Иванов) предложил использовать специальные призмennые системы, обладающие искусственным квазилинейным хроматизмом и дающие спектр со значительно уменьшенной неравномерностью дисперсии. Именно такие системы мы предполагаем использовать для бортового варианта ПМ-СП. Методика расчета этих систем и технология изготовления неплоских оптических поверхностей отрабатывалась на несколько более простых и доступных материалах, работающих в ближнем УФ- ($\lambda > 340$ нм) и видимом диапазонах спектра, которые мы использовали при разработке спектрометра-поляриметра сопровождения КЭ.

Угловая дисперсия одиночного клина определяется углом при его вершине и дисперсией вещества $dn/d\lambda = f(\lambda)$. Ход этой зависимости существенно зависит от сорта применяемого стекла. Для решения поставленной задачи необходимо подобрать пары стекол, дающие в сумме максимальную среднюю дисперсию при минимальной ее разнице на краях выбранного диапазона. Ход дисперсии по спектру индивидуален для каждого стекла и заметно различается даже для стекол одной и той же группы. Кроме того, применимость материалов может ограничиваться химической и радиационной устойчивостью, технологичностью, стоимостью и т. д., поэтому были проанализированы все стекла, производимые в странах СНГ, а также стекла фирмы «Schott», для которых имеется подробный каталог характеристик. Аналитические выражения $dn/d\lambda$, выводимые из аппроксимационных формул Шотта, Герцбергера и др., весьма громоздки и плохо подходят для сравнения стекол между собой, поэтому анализ проводился численными методами на конечных интервалах длин волн. Рассмотрим зависимость показателя преломления n среды от длины волны λ (рис. 2).

Выделим в начале и в конце заданного спект-

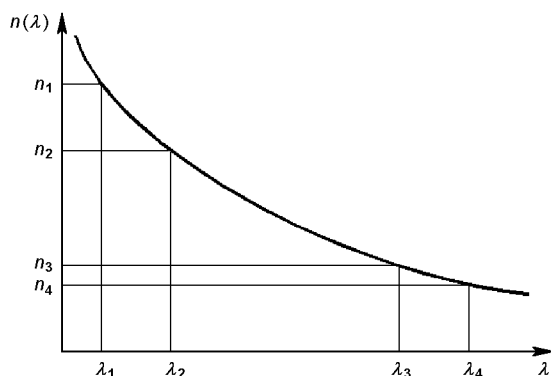


Рис. 2. Зависимость показателя преломления среды от длины волны

рального диапазона два участка одинаковой ширины $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_4 - \lambda_3 = \Delta\lambda$. Тогда полная дисперсия A среды во всем диапазоне $\lambda_1 - \lambda_4$, а также частные дисперсии B и C в поддиапазонах выражаются формулами

$$A = \alpha(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_4}), \quad (1)$$

$$B = \alpha(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}), \quad (2)$$

$$C = \alpha(n_{\lambda_3} - n_{\lambda_4}), \quad (3)$$

где α — угол при вершине клина. Поскольку для всех стекол в области их прозрачности величины A , B и C имеют один знак, то неравномерность дисперсии может быть устранена, если использовать комбинацию из двух клиньев, изготовленных из разных типов стекла с углами разных знаков (рис. 1). Запишем уравнение равномерности дисперсии для блока в целом

$$\alpha_1 B_1 - \alpha_2 B_2 = \alpha_1 C_1 - \alpha_2 C_2, \quad (4)$$

где индексы «1» и «2» относятся к первому и второму клину соответственно. Отсюда находим, что

$$\alpha_2 = \alpha_1 (B_1 - C_1) / (B_2 - C_2). \quad (5)$$

Тогда общая дисперсия блока будет равна

$$D = \alpha_1 A_1 - \alpha_2 A_2. \quad (6)$$

Очевидно, что следует подбирать пары стекол, обеспечивающих максимальное значение D при

соблюдении условия (5). Для дальнейшего анализа стекла выбирались из двух каталогов [1, 13] по критерию прозрачности при $\lambda = 365$ нм (коэффициент пропускания — не менее 0.8 при толщине 10 мм). Всего анализировалось более 70 стекол.

Для предварительного отбора введем так называемый коэффициент «прямызны» E :

$$E = A / (B - C). \quad (7)$$

Вычисления коэффициентов E проводились для клиньев с углом $\alpha = 10^\circ$ в диапазоне $\lambda\lambda = 370-870$ нм. В результате вычислений 64 типа стекол были разбиты на две группы с контрастными значениями E . Учет термического коэффициента расширения стекол дает возможность оценить в дальнейшем возможность склейки компонентов в моноблок. После предварительного выбора стекол по формулам (5), (6) можно вычислить отношения углов α_2/α_1 клиньев и полную дисперсию D блока. Эти вычисления выполнялись в следующей последовательности:

- поочередно составлялись все возможные пары стекол с контрастными значениями;
- подстановкой табличных данных о стеклах в формулы (5), (6) находились углы клиньев α_2 для флинтových стекол при заданном $\alpha_1 = 10^\circ$.

Всего было рассмотрено 19^2 соответствующих пар. Исходными данными для расчетов диспергирующей системы наземного варианта спектрополяриметра сопровождения являются: спектральный диапазон $\lambda\lambda = 0.37-0.87$ мкм, используемый телескоп — АЗТ-11; возможность наблюдать протяженные объекты. При этом дисперсия должна быть максимальной, а пара должна допускать корректировку аберраций. При предварительном расчете было проанализировано около 20 вариантов и пять оптических схем для каждого варианта, — всего около 100 схем.

На рис. 3 представлены оптические системы с наилучшими расчетными показателями: величина спектра около 1 мм при неравномерности 1-2, диаметр пятна около 20 мкм, каждую из которых можно взять за основу оптической схемы прибора.

На рис. 4 представлена модель оптической схемы спектрополяриметра с деформированными призмами.

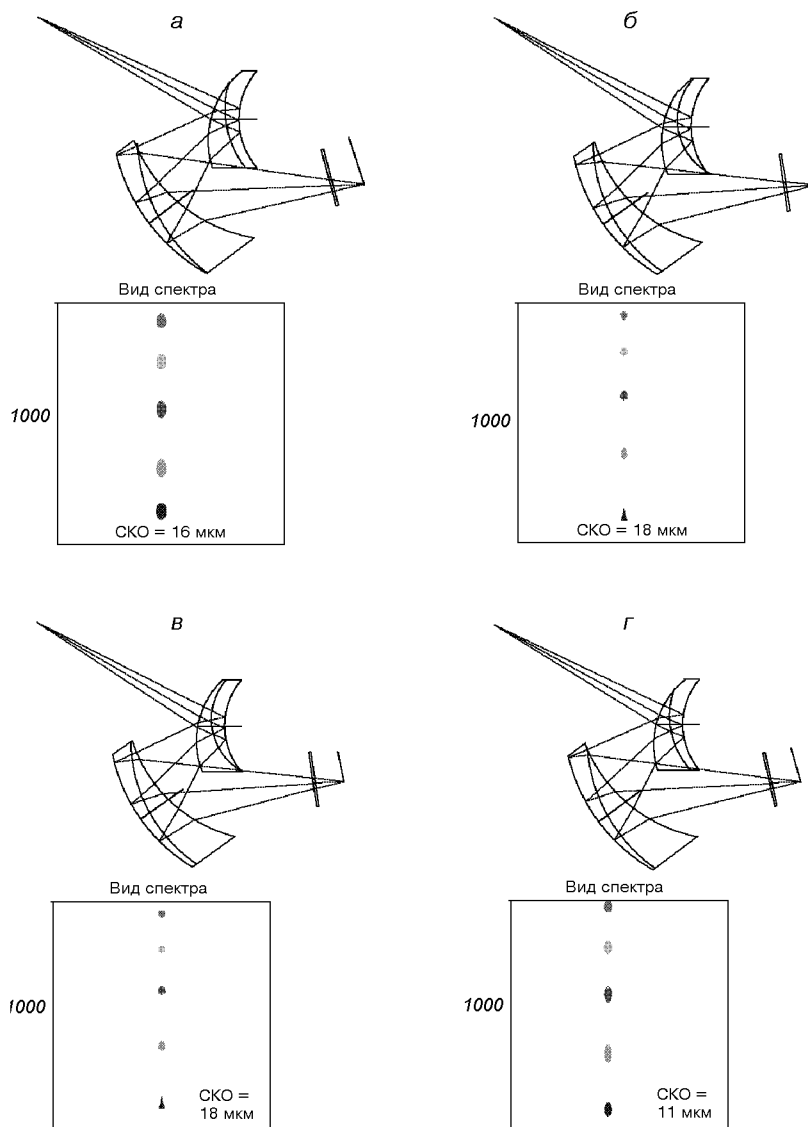


Рис. 3. Варианты рассчитанных схем: *а* — система из призм ФК11-Ф8, *б* — система из призм К8-Ф1, *в* — система из призм К81-Ф8, *г* — система из призм ЛК5-Ф8

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛЯРИМЕТРА СОПРОВОЖДЕНИЯ

Оптическая схема (ОС) СПС построена по традиционной схеме с коллиматором, диспергирующим блоком и камерным объективом. В качестве диспергирующего блока применена призмная

система, обеспечивающая квазиравномерную дисперсию по спектру.

Качество спектра изображения, выделенного диафрагмой или щелью, иллюстрируется точечной диаграммой, представленной на рис. 5. В плоскости приемника строится две спектральные полосы в обыкновенных и необыкновенных лу-

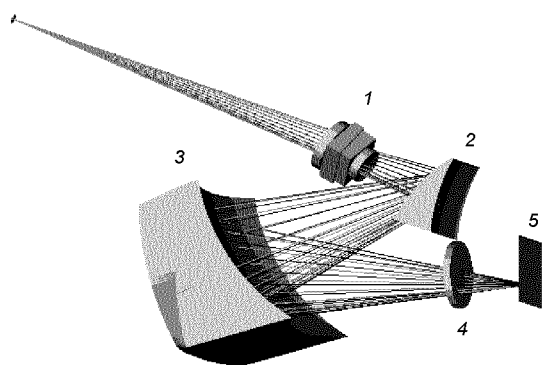


Рис. 4. Модель оптической системы спектрометра поляриметра с деформированными призмами: 1 — иммерсионная призма Волластона, 2 — кривая дисперсионная призма из стекла К8, 3 — составная дисперсионная призма из К8-Ф1, 4 — входное окно приемника, 5 — плоскость приемника изображения (ПИ)

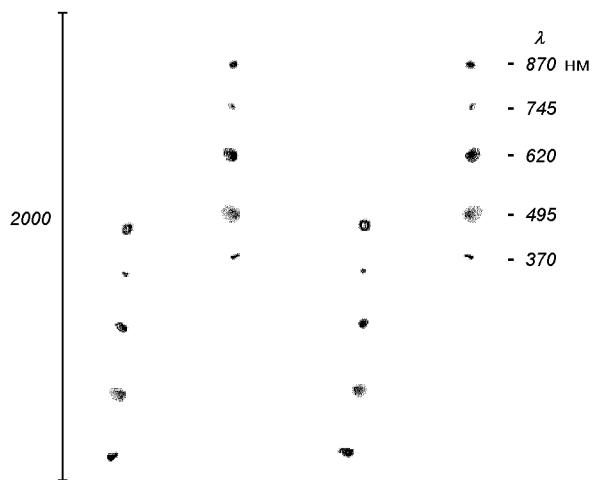


Рис. 5. Точечная диаграмма в плоскости приемника СПС

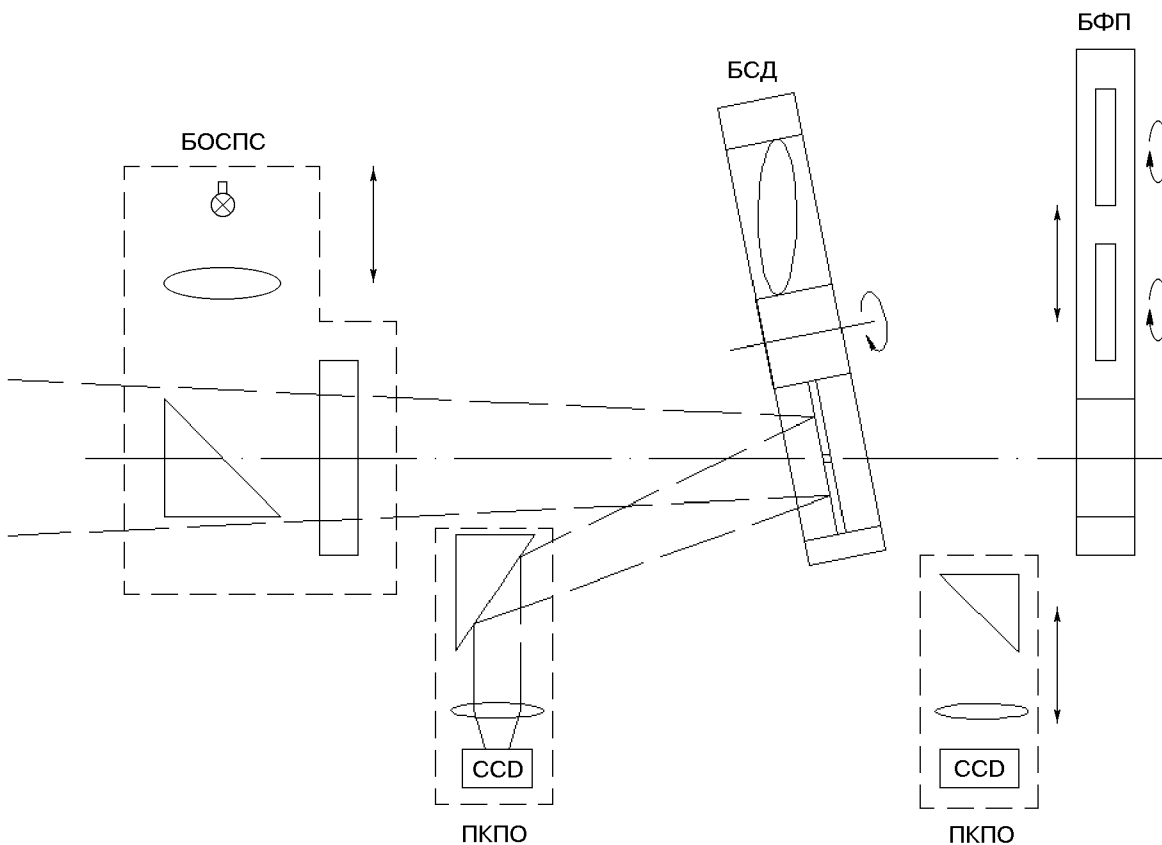


Рис. 6. Схема переднего блока: БОСПС — блок опорного спектрополяриметрического стандарта, БСД — блок сменных диафрагм, БФП — блок фазовых пластинок, ПКПО — устройство контроля положения объекта

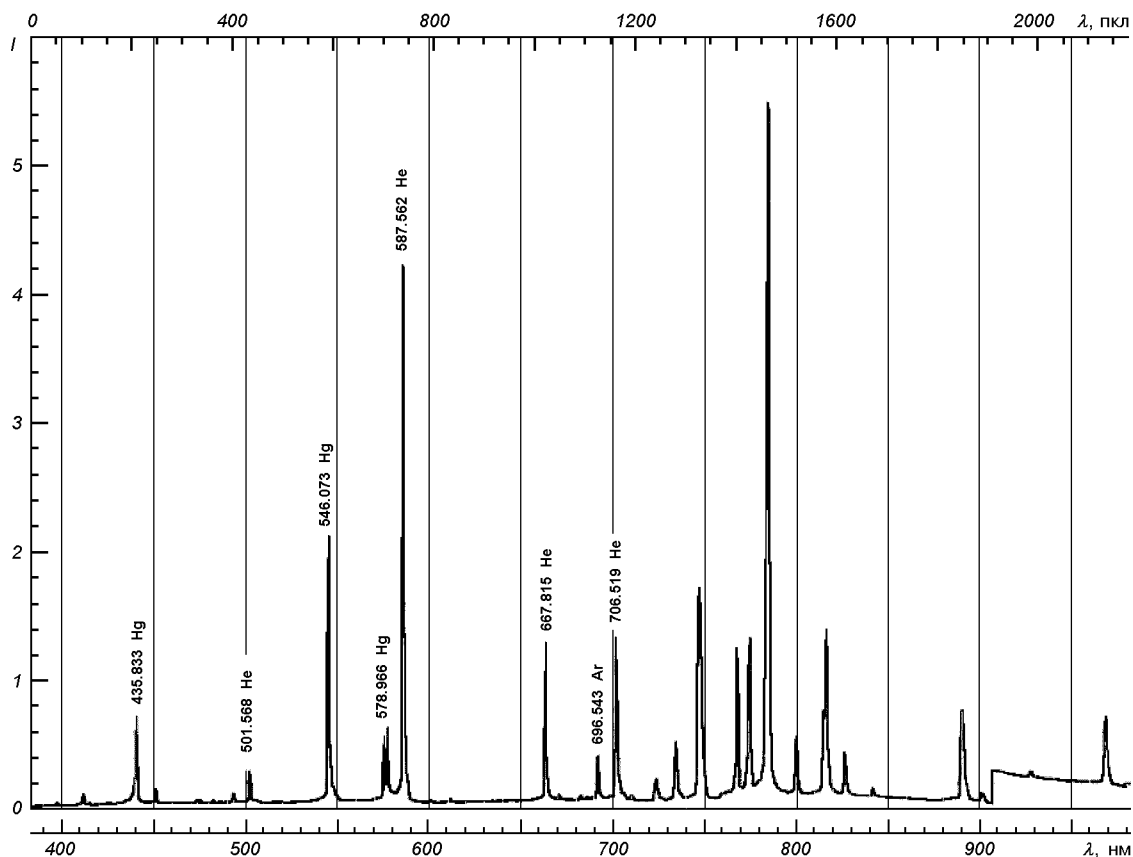


Рис. 7. Спектр гелиево-ртутной лампы в участке спектра $\lambda\lambda = 400\text{--}1000$ нм

чах для двух полей — объекта и фона, или же для одной длинной спектральной щели. В спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 370\text{--}870$ нм дисперсия почти равномерна, что способствует повышению эффективности прибора в целом.

КОНСТРУКЦИЯ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛЯРИМЕТРА СОПРОВОЖДЕНИЯ

Конструктивно оптико-механический блок (ОМБ) СПС состоит из трех субблоков, объединенных общим корпусом:

- передний блок (рис. 6), служащий для присоединения к позиционному подшипнику телескопа и содержащий блок спектральной и поляризационной калибровки; устройство подсмотра до диафрагмы (щели); устройство под-

смотра после диафрагмы (щели); блок сменных ахроматических фазовых пластин; блок сменных диафрагм (щелей) и некоторые другие вспомогательные конструктивные элементы;

- средний блок, содержащий основные элементы оптической схемы СПС: блок призмы Волластона с коллиматорной линзой; блок диспергирующих призм;
- задний блок, служащий для присоединения ПЗС-камеры и содержащий: фокусирующее устройство; устройство позиционирования камеры и камерный объектив.

Остановимся детально на каждой составной части ОМБ.

Блок сменных диафрагм СПС предназначен для выделения избранных деталей на поверхности протяженного небесного тела или отдельного точечного объекта. В нашем случае это вращаю-

щаяся турель с круглыми зеркальными диафрагмами разного диаметра (0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2 мм) и щелями (0,1 × 3,5 мм, 0,2 × 3,5 мм), которая наклонена под углом 82° к оптической оси. Отверстия конусоподобные для уменьшения искажений на диафрагме. Вместо одной из диафрагм предусмотрено размещение линзы поля, что позволит производить еще и панорамные наблюдения небесных объектов. Смена диафрагм осуществляется в автоматическом режиме по заданному алгоритму с помощью шагового двигателя.

Устройство контроля положения объекта представляет собой систему из двух (внешнего и внутреннего) окуляров, которые расположены до и после диафрагмы. При этом внешний окуляр смонтирован стационарно и используется для поиска нужного небесного объекта и его постоянного гидирования по ближним звездам или другим деталям протяженного астрономического тела. Внутренний окуляр может при необходимости вводиться на оптическую ось и выводиться из нее; он применяется для эпизодического контроля положения объекта в диафрагме. Окуляры фокусируют световые лучи на телевизионные ПЗС-камеры WAT-902H, с которых на экран монитора по команде наблюдателя выводится либо отображение фокальной части изображения небесной сферы на зеркальной диафрагме (щели), либо изображение объекта, пропущенного через диафрагму (щель).

Блок фазовых пластинок представляет собой движущуюся конструкцию, которая имеет три фиксированных положения: два для ахроматических фазовых пластинок (ФП) для синего и красного участков спектра и пустого отверстия, которое используется в тех случаях, когда при наблюдениях фазовая пластинка не применяется. Вращение ФП осуществляется с помощью шагового двигателя, который поворачивает фазовую пластинку на 22.50 ± 0.03 и фиксирует ее в каждом новом положении на выбранное наблюдателем время. Точность вращения и фиксации ФП контролируется оптической автоколлимационной системой.

Блок опорного спектрополяриметрического стандарта предназначен для спектральной калибровки прибора и его поляриметрического тракта. Основным элементом этого блока является лампа с необходимой яркостью в заданной

спектральной области. В общем случае лампа должна давать некоторое количество спектральных линий, более-менее равномерно распределенных по заданному спектральному диапазону. Ни один химический элемент такого набора не дает. Поэтому для калибровки по длинам волн была разработана специальная спектральная гелиево-ртутная лампа. Гелий и ртуть совместно создают необходимый нам набор линий, но, поскольку потенциалы возбуждения у них заметно различаются, то в общем объеме тлеющего разряда они одновременно гореть не могут. Для решения этой проблемы в лампу встроены специальные ионный насос, который выравнивает разность концентраций ионов между анодом и катодом, а также добавлен буферный газ аргон. На рис. 7 показан экспериментально измеренный и расшифрованный спектр излучения такой лампы.

Конструктивно лампа представляет собой модифицированную трубку Гейслера. Для повышения спектральной яркости разряд идет вдоль оптической оси. Для получения полностью поляризованного света на выходное окно газоразрядной лампы поставлен поляризатор.

ВЫВОДЫ

По разработанным чертежам заканчивается изготовление переднего блока СПС. К концу 2006 г. он будет объединен со средним блоком, содержащим все основные оптические (спектральные и поляризационные) элементы. В комплексе с ПЗС-камерой это и будет низкодисперсный спектрометр поляриметр сопровождения СПС для космического эксперимента «Планетный мониторинг» на спектральную область $\lambda\lambda$ 350—930 нм. С его помощью планируется выполнять наблюдения планет Солнечной системы, их спутников, астероидов, комет и звезд, выделяемых на небе круглыми диафрагмами или прямоугольными щелями. В связи с тем, что рабочий спектральный интервал спектрополяриметра сопровождения СПС и ультрафиолетового спектрометра поляриметра ПМ СП для космического эксперимента ПМ, который планируется установить на Международную космическую станцию, в диапазоне спектра $\lambda\lambda = 350—400$ нм перекрывается, то СПС будет также использо-

ван для независимого постоянного контроля состояния и чувствительности приемного тракта бортового спектрометра-поляриметра ПМ-СП.

1. ГОСТ 3514-76. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. — Введ. 06.10.76.
2. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.—354 с.
3. Мороз В. И. Физика планеты Марс. — М.: Наука, 1978.—412 с.
4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов: Изд. 2-е, доп. и перераб. — Л.: Машиностроение, 1975.—312 с.
5. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1969.—672 с.
6. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1975.—639 с.
7. Clancy R. T., Grossman, A. W., Wolff M. J., et. al. Water vapor saturation at low altitudes around Mars aphelion: a key to Mars climate? // *Icarus*.—1996.—122, N 1.—P. 36—62.
8. Gehrels T. (ed.) Jupiter. — Tucson, Arizona: Univ. Press, 1983.—612 p.
9. Gehrels T., Mattheus M. S. Saturn. — Tucson, Arizona: Univ. Press, 1984.—686 p.
10. Hansel S. A., Wells W. K., Hunten D. M. Optical detection of lightnings on Venus // *Icarus*.—1995.—117, N 2.—P. 345—351.
11. Hunten D. M., Colin L., Donahue T. M., et. al. Venus. — Tucson, Arizona: Univ. of Arizona Press, 1983.—863 p.

12. Kieffer H. H. Mars. — Tucson, Arizona: Univ. Press, 1992.—1494 p.
13. SCHOTTTM. Katalog Optisches Glas "SCHOTT-2000". — 2000.—723 p.

**SPECTROPOLARIMETER OF GROUND-BASED
ACCOMPANYING FOR THE SPACE EXPERIMENT
«PLANETARY MONITORING»**

*A. P. Vid'machenko, Yu. S. Ivanov, A. V. Morozhenko,
E. P. Nevodovsky, I. I. Syniavskiy, M. G. Sosonkin*

It is planned to manufacture the spectropolarimeter to measure the linear polarization of radiation from celestial objects in a spectral region of 350 to 930 nm. The polarimeter will satisfy the following requirements: it will be equipped with panoramic light-receiver; the number of elements and their thickness will be minimized; each optical element of polarimeter should be designed to realize the a maximal number of functions (power, polarimetry, correction) simultaneously. It is proposed to exclude the dispersive elements from the polarimeter construction. Instead of these elements, the Wollaston prism of unique construction will be used. It will consist of two wedges with spherical surfaces assembled at the optical contact, and the curvature centers of the wedges will be displaced. The Wollaston prism will be utilized as the splitting-beam polarization prism (just as in ordinary polarimeters) as well. So, the functions of image constructions, of selection by wavelengths, and of polarization analysis will be concentrated in one ordinary element. This will allow us to increase the device light transparency by three to ten times.