

УДК 523.3:523.4

Я. С. Яцкив, А. П. Видьмаченко, А. В. Мороженко,
М. Г. Сосонкин, Ю. С. Иванов, И. И. Синявский

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Спектрополяриметрическая аппаратура для внеатмосферного исследования тел Солнечной системы

Представлено 03.09.07

Обґрунтовується доцільність використання поляриметричної апаратури при підготовці й реалізації космічних експериментів для проведення безперервного й довгострокового контролю явищ, що відбуваються на поверхні та в атмосфері Землі, у навколосемному космосі, на Місяці, планетах Сонячної системи й інших порівняно яскравих небесних об'єктах.

Исследование Земли, атмосферных и безатмосферных тел Солнечной системы, межпланетного космического пространства включает контактные и дистанционные методы диагностики атмосфер, ионосфер, магнитосфер и поверхностей исследуемых небесных объектов, которые в совокупности дают возможность осуществления их полного мониторинга.

При подготовке любого космического эксперимента (КЭ) необходимо использовать как можно более полный комплекс наблюдательной аппаратуры, с помощью которой можно проводить исследования в ультрафиолетовом (УФ), в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах. Во всех перечисленных диапазонах применяется метод пассивного контроля без воздействия на исследуемый объект.

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Обычно такие задачи решаются с помощью приборов, ориентированных на исследование интенсивности приходящего от небесных объектов света. В то же время интенсивность является

всею лишь одним из четырех параметров вектора Стокса, который характеризует электромагнитное излучение, идущее от небесного тела. Методы спектрополяриметрии с высокой степенью достоверности позволяют определять [12]:

- величину комплексного показателя преломления вещества частиц облачного слоя планетных атмосфер или на поверхности небесных тел;
- параметры функции распределения частиц по размерам;
- наличие ориентированных частиц в планетных атмосферах;
- разницу положения верхней границы облачных слоев над деталями атмосферы.

Известно, что все приемники оптического излучения реагируют лишь на смену интенсивности светового потока, но не реагируют на состояние его поляризации. Поэтому все методы определения степени поляризации света основаны на преобразовании вектора Стокса от источника излучения в скалярную величину. Для этого используют специальные устройства (поляроидные модуляторы), которые устанавливаются пе-

ред приемниками излучения. При прохождении света через такие материалы возникает оптическая разность хода между ортогональными слагаемыми. Величина этой разности пропорциональна квадрату напряжения электрического поля. В двухэлементном модуляторе вращается фазосдвигающая пластина (ФП), а поляризатор установлен неподвижно.

Матрица преобразования ФП с фазовым сдвигом Δ имеет вид

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G+H\cos 4\varphi_1 & H\sin 4\varphi_1 & -\sin\Delta\sin 2\varphi_1 \\ 0 & H\sin 4\varphi_1 & G-H\cos 4\varphi_1 & \sin\Delta\cos 2\varphi_1 \\ 0 & \sin\Delta\sin 2\varphi_1 & \sin\Delta\sin 2\varphi_1 & \cos\Delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

а световой луч модулируется соответственно выражению

$$I(\omega_2 t) = 0.5 [I_0 + GQ_0\cos 2\varphi_2 + HQ_0\cos 2(2\varphi_1 - \omega_1 t) + HU_0\sin 2(2\varphi_1 - \omega_1 t) - V_0\sin\Delta\sin 2(\varphi_1 - \omega_1 t)], \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} G &= 0.5(1 + \cos\Delta), \\ H &= 0.5(1 - \cos\Delta), \end{aligned} \quad (3)$$

При анализе линейно поляризованного света используют ФП со сдвигом фазы на 180° , для которой $G = 0$, а $H = 1$. Тогда выражение (2) сводится к выражению

$$I(\omega_2 t) = 0.5 [I_0 + Q_0\cos 2(2\varphi_1 - \omega_2 t) + U_0\sin 2(2\varphi_1 - \omega_2 t)]. \quad (4)$$

Для анализа эллиптически поляризованного излучения обязательно необходимо использовать поляроидный модулятор. В его состав должен входить неподвижный поляризатор и фазосдвигатель.

Довольно часто используют фазовую пластину (со сдвигом фазы на 90°). Если в таком модуляторе поляризатор неподвижный ($\omega_2 = 0$) или его угловая скорость в два раза превышает угловую скорость обращения ФП ($\omega_2 = 2\omega_1$), то выражение (2) сводится к выражению

$$I(t, 90^\circ) = 0.5 [I_0 + 0.5Q_0(1 + \cos 4\omega_1 t) + 0.5U_0\sin 4\omega_1 t \pm V_0\sin 2\omega_1 t]. \quad (5)$$

Знаки плюс или минус перед четвертым параметром Стокса ставят в случае неподвижного или подвижного поляризатора соответственно.

Широкое использование ФП продолжительное время сдерживалось тем, что фазовый сдвиг одноэлементных пластин сильно зависит от длины волны. Поэтому на небольшой участок спектра необходимо было изготавливать отдельную пластину. При этом эффективно можно было работать только в узких спектральных интервалах. Сейчас эти ограничения сняты. Так, еще в 1954 г. Панчаратман [11] разработал трехэлементную ФП. Каждый ее элемент также представлял набор из двух пластин, изготовленных из разных двупреломляющих материалов (Mg_2 и Si). Для каждого из них величина фазового сдвига и положения оси в спектральном интервале 300—1000 нм изменялись в пределах $\pm 2^\circ$ и $\pm 3^\circ$ соответственно. Она получила название суперхроматической фазосдвигающей пластины (САФП).

В середине 1980-х гг. В. А. Кучеров [7, 8] рассчитал многокомпонентные САФП, которые могли быть изготовлены не только из одного материала (кристаллического кварца), но и из растянутых пленок полипропилена, полиэтиленмерафталата и т. п. На рис. 1 приведено сравнение САФП, разработанной в ГАО НАНУ, и пластинки, установленной на телескопе имени Хаббла.

При практической реализации поляриметрических приборов их конструкция определяется

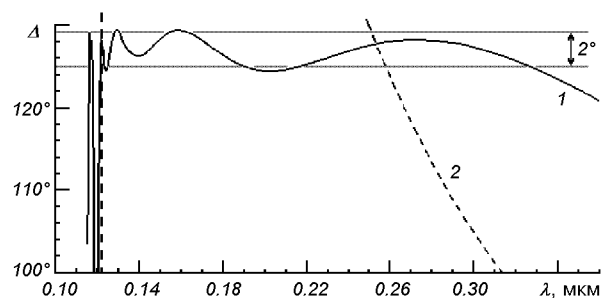


Рис. 1. Сравнение характеристик двух фазовых пластин: 1 — проект Т-170, 2 — телескоп Хаббла

типом используемых приемников излучения, устройствами спектральной селекции и т. д.

Так, в своих пионерских поляриметрических исследованиях тел Солнечной системы Лио [10] использовал визуальный поляриметр на принципе интерференционного полярископа Савара. Несмотря на простоту прибора, погрешность при определении степени поляризации света была около 0.1 %.

В пятидесятых годах прошлого столетия на смену визуальным поляриметрам стали использовать панорамные приемники и фотоумножители (ФЭУ). Их принцип работы основан на использовании модуляционной зависимости (2). Использовалась методика с дискретным изменением положения оптической оси поляризатора с шагом $\Delta\varphi$. Значение степени поляризации P и положение плоскости поляризации φ определялись из систем трех или четырех уравнений:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2\varphi_0 + U_0 \sin 2\varphi_0), \\ I_2 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 60^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 60^\circ)), \\ I_3 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 120^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 120^\circ)), \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2\varphi_0 + U_0 \sin 2\varphi_0), \\ I_2 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 22.5^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 22.5^\circ)), \\ I_3 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 45^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 45^\circ)), \\ I_4 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 67.5^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 67.5^\circ)). \end{aligned} \quad (7)$$

Использовались и другие значения шага $\Delta\varphi$. При измерениях необходимо уделять особое внимание точности отработки шагов, чтобы в системе уравнений (6) углы $\Delta\varphi_{12}$ и $\Delta\varphi_{23}$ различались менее чем на $1.5'$. В противном случае систематическая ошибка вычисления степени поляризации превысит 0.1 %.

При наблюдениях с одно канальным приемником используют так называемый метод Мехкюра. В нем поляризатор непрерывно вращается с

небольшой угловой скоростью ω , а интенсивность $I(\omega)$ регистрируется соответствующим приемником света. Тогда значение степени поляризации определяется выражением

$$P = 2(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (8)$$

где I_{\max} и I_{\min} — наибольший и наименьший отсчет в выражении $P \cos 2(\varphi - \omega)$ уравнения (2).

Все рассмотренные выше методы наблюдений требуют последующей обработки полученной информации для вычисления данных о поляризационных свойствах света. В конце 1950 гг. Л. В. Ксанфомалити [6] предложил использовать систему автоматического регулирования высокого напряжения ФЭУ при наблюдениях в аналоговом режиме. Если система регулирования линейна в широких пределах изменения интенсивности, то вычисленная средняя интенсивность $0.5(I_{\max} + I_{\min})$ будет неизменной. Тогда переменная часть сигнала $P \cos 2(\varphi - \omega)$, деленная на эту постоянную величину $0.5(I_{\max} + I_{\min})$, представляет собой степень поляризации.

Существенным недостатком аналогового режима были тепловые шумы от ФЭУ и от системы усилителей. Это требовало постоянного контроля над дрейфом сигнала с нулевой интенсивностью.

Этот недостаток практически отсутствует при работе в режиме подсчета отдельных фотонов (импульсов). Такой режим работы позволил О. И. Бугаенко с коллегами [2] разработать систему автоматического поляриметра. В нем также использовалось непрерывное вращение поляризатора, но уже с частотой 75 Гц, и впервые было предложено модулированную интенсивность (2) регистрировать четырьмя счетчиками на протяжении половины периода оптической модуляции светового потока. При этом начало регистрации сигнала в каждом счетчике специальными электронными ключами было сдвинуто по фазе на $\pi/2$. Данные в этих счетчиках представляли собой систему величин

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(\pi - 2U) \quad \text{для} \quad 0 \leq 2\omega t \leq \pi, \\ I_2 &= I_0(\pi + 2U) \quad \text{для} \quad \pi \leq 2\omega t \leq 2\pi, \\ I_3 &= I_0(\pi - 2Q) \quad \text{для} \quad (\pi/2) \leq 2\omega t \leq 3\pi/2, \\ I_4 &= I_0(\pi + 2Q) \quad \text{для} \quad 3\pi \leq 2\omega t \leq 5\pi, \end{aligned} \quad (9)$$

комбинация которых определяла значения пара-

метров Стокса:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 &= 4\pi I_0, \\ I_2 - I_1 &= 4I_0 U = 4u, \\ I_4 - I_3 &= 4I_0 = 4q. \end{aligned} \quad (10)$$

На практике использовалось три счетчика для подсчета этих величин: $4\pi I_0$, $4u$ и $4q$. Если задавать накопление интенсивности $4\pi I_0$, то счетчики 2 и 3 будут уже регистрировать отношение $4u/4\pi I_0$ и $4q/4\pi I_0$, то есть безразмерные параметры Стокса U и Q . При этом количество импульсов $4\pi I_0$ в счетчике задавалась соответственно требованию, чтобы значение параметров Q и U регистрировались с требуемой статистической погрешностью. Оказалось, что благодаря такой большой скорости вращения поляризатора стало возможно практически без потери точности проводить наблюдения даже при нестабильной прозрачности земной атмосферы. Погрешность определения степени поляризации была около 0.05 % [4, 9].

Эта же идея была использована при разработке в ГАО НАН Украины спектрополяриметра [1, 3, 5] с одновременным измерением всех четырех параметров Стокса. 127-градусная САФП вращалась с частотой 61 Гц, а промодулированная интенсивность (2) специальными электронными ключами разбивалась на восемь равных интервалов:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) + \\ &+ U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } 0 \leq \pi/8, \\ I_2 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) + \\ &+ U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } \pi/8 \leq \pi/4, \\ I_3 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) - \\ &- U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } \pi/4 \leq 3\pi/8, \\ I_4 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) - \\ &- U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } 3\pi/8 \leq \pi/2, \\ I_5 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) + \\ &+ U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } \pi/2 \leq 5\pi/8, \\ I_6 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) + \\ &+ U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } 5\pi/8 \leq 3\pi/4, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_7 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) - \\ &- U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } 3\pi/4 \leq 7\pi/8, \\ I_8 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) - \\ &- U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } 7\pi/8 \leq \pi. \end{aligned}$$

Их комбинация позволяла в четырех счетчиках накапливать информацию обо всех четырех параметрах Стокса:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 &= \\ &= \pi(I_0 + 0.2Q_0)/2 = I'/2, \\ I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 - I_7 + I_8 &= 0.8Q = q, \\ I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 + I_6 - I_7 - I_8 &= 0.8U = u, \\ I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_5 - I_6 - I_7 - I_8 &= 0.8V = v. \end{aligned} \quad (12)$$

Если в таком модуляторе использовать 180-градусную фазосдвигающую пластину, то система (12) сведется к системе

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 &= \\ &= \pi I_0/2 = I'/2, \\ I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 - I_7 + I_8 &= Q = q, \\ I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 + I_6 - I_7 - I_8 &= U = u, \\ I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_5 - I_6 - I_7 - I_8 &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку коэффициенты модуляционного выражения (2) зависят от величины Δ , то и связь между нормированными и наблюдаемыми значениями будет также зависеть от фазового сдвига, например

$$\begin{aligned} Q_0(U_0) &= 1.6q(u)/I' \text{ для } \Delta = 127^\circ, \\ Q_0(U_0) &= 2.0q(u)/I' \text{ для } \Delta = 180^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотренные ситуации для САФП в 127° и 180° — идеальные. Поскольку даже в случае суперахроматических АФП фазовый сдвиг зависит от длины волны, то без учета этого фактора параметры поляризованного излучения будут определяться с погрешностью. Например, при использовании АФП в 180° погрешность определения параметров Q и U будет вычисляться по формуле

$$\Delta Q(U) = 0.5(1 - \cos\Delta)Q(U). \quad (15)$$

Δ , град	$Q(U)$, %		
	1 %	10 %	30 %
180	0	0	0
175	0.0019	0.019	0.057
170	0.0075	0.075	0.225
165	0.034	0.34	1.000

Но эта погрешность имеет систематический характер, и ее можно учесть при обработке наблюдений. Отметим, что при использовании полуволновой фазовой пластины нет необходимости синхронизировать положение АФП с началом работы соответствующих ключей для каждого из восьми секторов модуляционной кривой интенсивности. Но при использовании 127° АФП должны быть довольно жесткие требования к синхронизации начала работы всех электронных ключей с положением оптической оси фазосдвигающего.

Два таких прибора было изготовлено в 1985 г. на область спектра 340—760 нм. Они были установлены в фокусах Кассегрена 60 см телескопов и продолжительное время эксплуатировались на наблюдательных базах ГАО НАН Украины в Узбекистане (обсерватория на горе Майданак) и в Боливии (обсерватория Санта Анна около города Тариха). Третий образец спектрополяриметра в 1995 г. был модернизирован, и его спектральный интервал расширен до 1 мкм; в нем используются ФЭУ с InAsGa-фотокатодом.

Исходя из имеющегося в ГАО НАН Украины опыта разработки спектрополяриметрической аппаратуры, сотрудники обсерватории с 2003 года ведут интенсивные работы по созданию технологических макетов и бортовых приборов. Для других приборов производится планирование, разработка и создание соответствующих экспериментальных установок. Так, в настоящее время в ГАО НАН Украины по контракту с Национальным космическим агентством Украины в рамках российско-украинского космического эксперимента (КЭ) «Планетный мониторинг» (ПМ) выполняется изготовление УФ-спектрометра-поляриметра (ПМ-СП), предназначенного для измерения интенсивности, степени линейной поляризации и положения плоскости поляризации отраженного верхними слоями

планетных атмосфер солнечного излучения в интервале длин волн 230—390 нм. ПМ-СП запланирован как один из четырех приборов, которые намечено установить на «Планетном телескопе Т-400» на российском модуле Международной космической станции (МКС).

Он позволит получить экспериментальные данные для изучения физических и оптических свойств аэрозольной составляющей верхних слоев планетных атмосфер, в том числе и земной атмосферы на высотах более 30 км. Ранее эксперименты такого рода для атмосферы Земли не проводились. С 2006 г. украинская сторона начала разработку еще и второго из четырех запланированных на Т-400 приборов — статического фурье-спектрометра (СФС) на УФ-область спектра.

При разработке прибора ПМ-СП учитывались следующие требования к составу и компоновке поляризационного блока для установки его в инструментальном отсеке планетного телескопа (ПТ) МКС.

1. Спектрополяриметр должен быть автономным прибором с собственным панорамным светоприемником.

2. Материалы, работающие в заданном спектральном диапазоне, имеют пониженное пропускание в области до 230 нм. Поэтому для достижения высокой эффективности необходимо минимизировать как количество элементов, так и их толщины.

3. Для наблюдений протяженных объектов (планет) спектральный блок прибора должен содержать щель. Минимизация количества оптических элементов приводит к децентрировкам схемы; при этом преобладающие aberrации в изображении — астигматизм и кома, расширяющие функцию рассеяния точки (ФРТ) до 40—50 мкм. Эти aberrации должны быть скорректированы (ФРТ не должна быть шире пиксела приемника).

4. Фазовая пластина (ФП) в сходящихся пучках вносит все виды aberrаций. Эти aberrации также должны быть исправлены.

Работа оптической схемы (ОС) ПМ-СП основана на разработках ГАО НАНУ, проводившихся в следующих направлениях:

— расчет, разработка и отработка технологии изготовления суперхроматических фазовых пластин, для которых фазовый сдвиг являет-

- разработка призмных систем с квазиравномерной дисперсией;
- разработка сепараторов по поляризации с уменьшенными систематическими погрешностями.

Оптическая схема ПМ-СП — пространственная; углы преломления (отражения) рассчитаны так, чтобы обеспечить размещение ОС в заданных габаритах. Ход лучей в ОС представлен на рис. 2. В плоскости приемника строятся две спектральные полосы (в обыкновенных и нео-

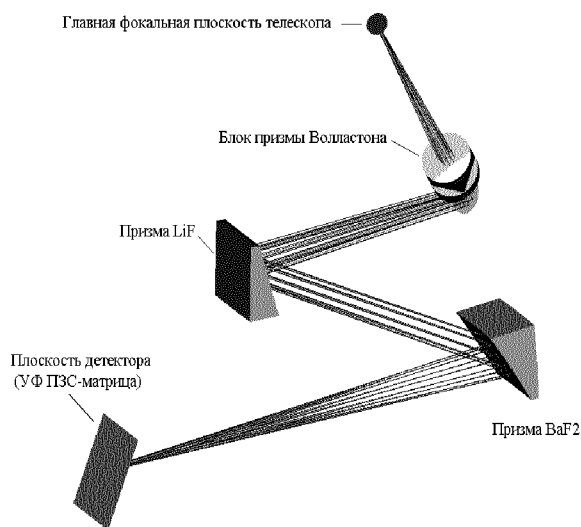


Рис. 2. Ход лучей в ОС ПМ СП

быкновенных лучах). Оптическая схема рассчитана так, что в заданном спектральном диапазоне 230—390 нм дисперсия почти равномерна, что способствует повышению эффективности прибора в целом.

Для проверки принятых решений и отработки соответствующих технологий был разработан и изготовлен макет ПМ-СП. При изготовлении макета было принято единственное упрощающее положение — блок призм был заменен дифракционной решеткой. Конструкция всех остальных элементов и узлов была максимально приближена к полетному варианту.

После входного блока по ходу лучей расположена призма Волластона. Особенностью разработанной схемы является деформация поверхностей призмы для лучшего исправления aberrаций. Такая призма была изготовлена, ее испытания показали полное соответствие расчетным характеристикам. Далее по ходу лучей установлена зеркальная щель, камерное зеркало и диспергирующий узел — дифракционная решетка. Испытания макета показали соответствие его расчетным характеристикам: спектральный диапазон — 0.23—0.45 нм; разрешение по спектру — более 25 элементов; линейное разведение О- и Е-лучей — 2 мм; воспроизводимость поворота фазовой пластины — менее 40°.

Для отработки технологии изготовления ПМ-СП, а также для дополнительной возможности проведения наземной калибровки полетного варианта ПМ-СП был изготовлен спектрометр-поляриметр сопровождения (СПС) КЭ ПМ. Опти-

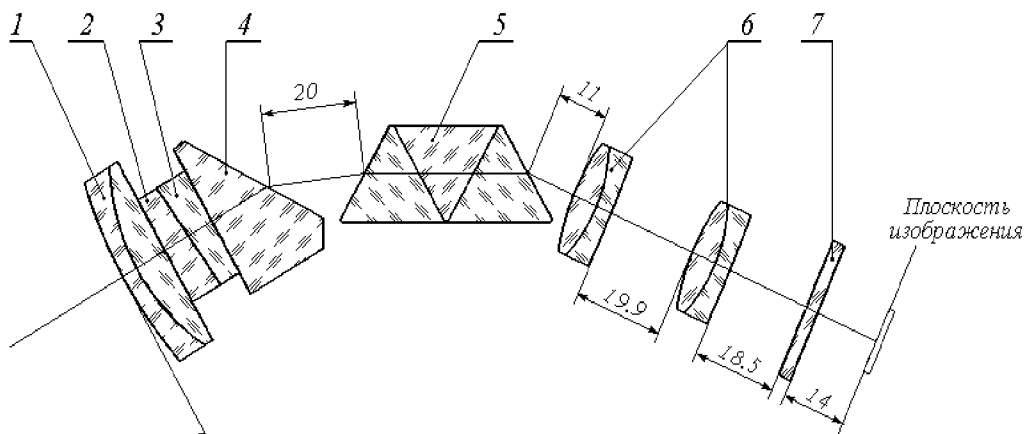


Рис. 3. Оптическая схема СПС: 1 — коллиматор, 2, 3 — призма Волластона, 4, 5 — диспергирующая призмная система, 6 — камерный объектив, 7 — защитное окно матрицы

ческая схема СПС (рис. 3) построена по традиционной схеме с коллиматором, диспергирующим блоком и камерным объективом. В качестве диспергирующего блока применена специальная призмная система, обеспечивающая квазиравномерную дисперсию по спектру.

В плоскости приемника строятся изображения двух спектров в обыкновенных и необыкновенных лучах для двух полей — объекта и фона, или же для одной длинной спектральной щели. В спектральном диапазоне 350—900 нм дисперсия почти равномерна. Качество спектра, выделенного диафрагмой или щелью части изображе-

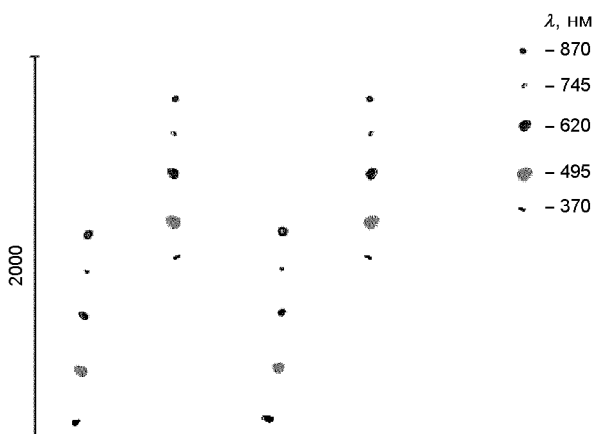


Рис. 4. Точечная диаграмма в плоскости приемника СПС

ния, иллюстрируется точечной диаграммой, представленной на рис. 4. Параметры оптических элементов были промерены на специально разработанном стенде и показали хорошее соответствие расчетам.

Конструктивно оптико-механический блок (ОМБ) СПС построен по модульному принципу и состоит из трех модулей, объединенных общим корпусом:

а) входной модуль (рис. 5), служащий для присоединения к позиционному подшипнику телескопа, содержит:

- блок спектральной и поляризационной калибровки,
- устройство контроля положения объекта,
- блок сменных ахроматических фазовых пластин,
- блок сменных диафрагм (щелей),
- некоторые другие вспомогательные конструктивные элементы,

б) модуль анализа содержит основные анализирующие элементы ОС СПС: блок призмы Волластона с коллиматорной линзой и блок диспергирующих призм;

в) модуль регистрации содержит фокусирующее устройство ПЗС-камеры; устройство позиционирования камеры; камерный объектив и собственно ПЗС-камеру.

Остановимся детально на каждой составной части ОМБ СПС.

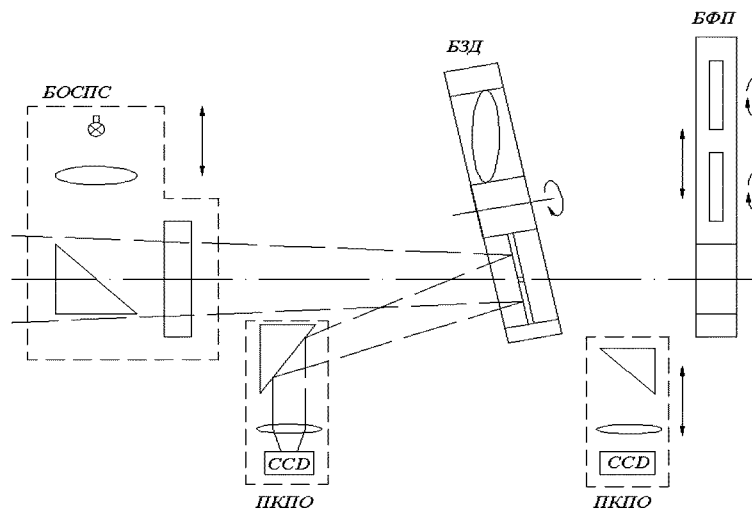


Рис. 5. Схема входного модуля: БОСПС — блок опорного спектрополяризационного стандарта, БЗД — блок сменных зеркальных диафрагм, БФП — блок фазовых пластинок, ПКПО — устройства контроля положения объекта

Блок сменных зеркальных диафрагм. СПС предназначен для выделения избранных деталей на поверхности протяженного небесного тела или отдельного точечного объекта. В нашем случае это вращающаяся 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, 0.2×3.5 мм), которая наклонена под углом 82° к оптической оси. Отверстия сделаны конусоподобными и с расширениями в сторону, противоположную к телескопу, что уменьшает вероятность появления паразитных эффектов взаимодействия светового потока с «телом» диафрагмы. Вместо одной из диафрагм предусмотрено размещение линзы поля, что позволит проводить 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, соответственно, расположены до и после диафрагмы. При этом внешний окуляр смонтирован стационарно и используется для поиска нужного небесного объекта и его постоянного гидирования относительно рядом расположенных звезд или других деталей 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 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 $22.50 \pm 0.03^\circ$ и фиксирует ее в каждом новом положении на выбранное на-

блюдателем 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 в НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И. И. Мечникова была разработана специальная спектральная гелиево-ртутная лампа.

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.

Часть оптической схемы на исследовательском стенде прибора СПС показана на рис. 6.

Схема получения спектрополяриметрического скана изображения Луны, вырезаемого щелью спектрополяриметра СПС, показана на рис. 7.

Для изучения свойств стратосферного аэрозоля в атмосфере Земли в ГАО НАН Украины при участии Национального технического университета (КПИ) был разработан и изготовлен упрощенный вариант фотополяриметра УФП, мощности которого рассчитаны на установку на украинский молодежный спутник УМС. Его принципиальная схема представлена на рис. 8. В настоящее время разрабатывается усовершенствованный вариант УФП с вращающимся блоком поляридного модулятора (рис. 9).

На конкурс проектов по исследованию космического пространства в рамках Глобальной стратегии исследований (GES) Главная астрономическая обсерватория НАН Украины представила следующие проекты, которые объединяет то, что во всех них предлагаются исследования с помощью спектрополяриметрической и/или фотополяриметрической аппаратуры.

1. Разработка перспективных методик исследований и создание нового поколения приборов



Рис. 6. Часть оптической схемы спектрометра поляриметра сопровождения на исследовательском стенде

для проведения внеатмосферных астрономических исследований («Астро-2»).

Конечной целью проекта является завершение работ по созданию новых приборов «ультрафиолетовый спектрометр-поляриметр ПМ-СП» и «статический фурье-спектрометр СФС на УФ-область спектра», которые запланированы как два из четырех приборов, входящих в состав научной аппаратуры российско-украинского космического эксперимента на МКС «Планетный мониторинг».

Приборы предназначены для регистрации спектральной и поляриметрической информации о газовой-аэрозольных составляющих планетных атмосфер и физико-химических характеристиках поверхностей безатмосферных астрономических тел в диапазоне спектра 230—390 нм. Эти наблюдательные данные позволяют оценить оптические и физические характеристики верхних атмосфер и стратосфер планет, а также обнаружить корреляции между изменениями оптических и тепловых свойств планетных атмосфер и солнечным облучением.

2. Разработка и создание ультрафиолетового спектрополяриметра УФ-СП для изучения аэрозольной составляющей и озона в атмосфере Марса с борта орбитального аппарата планеты («УкрМарс-сателит»).

Целью являются создания нового прибора «Ультрафиолетовый Спектрополяриметр» УФ-СП для изучения аэрозольной составляющей и озона в атмосфере Марса с борта орбитального аппарата. Прибор предназначен для получения

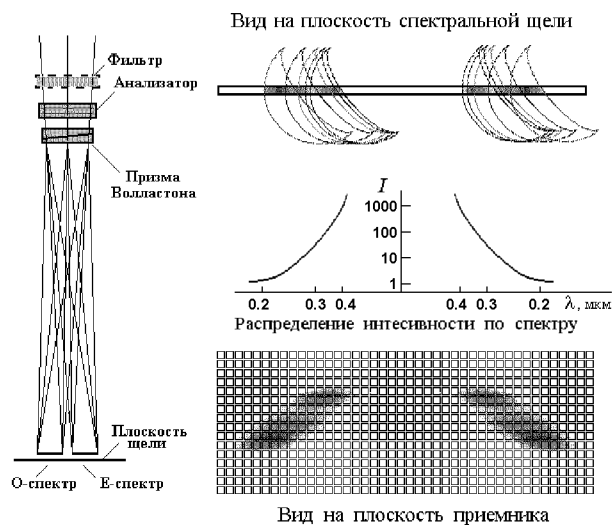


Рис. 7. Схема получения спектрополяриметрического скана изображения Луны, вырезаемого щелью спектрополяриметра СПС

наблюдательных данных о степени линейной поляризации солнечного света, отраженного атмосферой Марса, при фазовых углах в пределах от 0 до 180°. С помощью прибора УФ-СП необходимо на длинах волн в интервале 230—390 нм получить фазовые зависимости интенсивности, степени и положение плоскости поляризации отраженного верхней атмосферой Марса солнечного света. Эти данные разрешат определить физико-химические характеристики аэрозольной и озонной составляющей атмосферы Марса с точностью, которая превосходит существующие на сегодня данные. Мы предлагаем упростить решение этой задачи путем использования дистанционных наблюдательных данных в ультрафиолетовом участке спектра о значении второго параметра Стокса Q , величина которого главным образом формируется в процессе лишь однократного рассеяния.

3. Разработка и создания ультрафиолетового спектрофотополяриметра УФ-СФП для дистанционного минералогического картирования поверхностного слоя Луны с борта лунного орбитального аппарата («Укрселена-сателит»)

Целью являются создания прибора «Ультрафиолетовый спектрофотополяриметр» УФ-СФП для дистанционного минералогического картоиро-

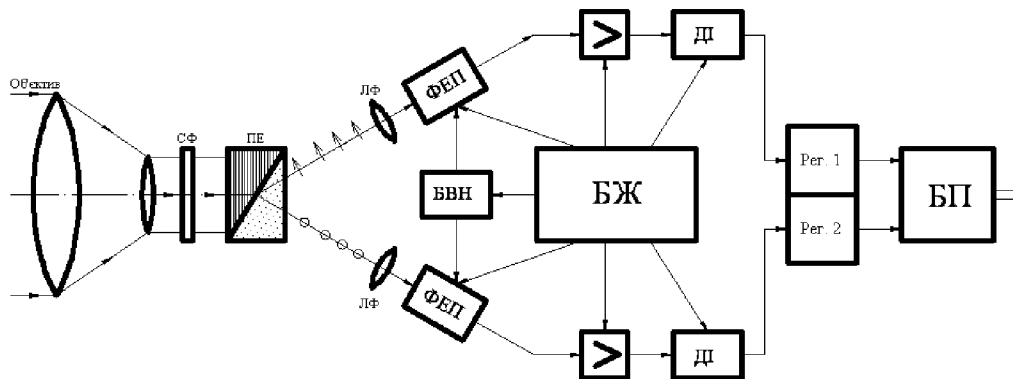


Рис. 8. Принципиальная схема УФП для УМС. СФ — светофильтр, ПЕ — поляризационный элемент, ЛФ — линза Фабри, ФЭП — фотоэлектронный умножитель, ДИ — дискриминатор импульсов, БВН — блок высокого напряжения, БЖ — блок питания, Рег. 1, Рег. 2 — регистры, БП — блок формирования, обработки и передачи информации

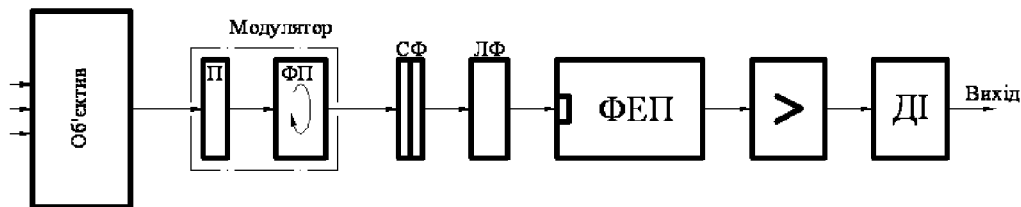


Рис. 9. Функциональная схема фотополяриметра с вращающимся поляроидным модулятором

вания поверхностного слоя Луны. Из зарегистрированной поляриметрической информации о физико-химических характеристиках поверхностного слоя в диапазоне спектра 230—280 (390) нм будут определены значения фазового угла с максимальным значением линейной поляризации солнечного света отраженного лунной поверхностью. Это позволит рассчитать значение комплексного показателя преломления частиц на поверхности и выполнить дистанционное минералогическое картирование поверхности Луны с точностью, которая превосходит существующие на сегодня данные.

4. Разработка и создание аппаратных комплексов для дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли с борта микроспутника в лунной точке Лагранжа («Укрселена—Лагранж»).

5. Разработка и создание аппаратных комплексов для дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли из лунной базы на поверхности Луны («Укрселена—поверхность»).

Целью проектов 4 и 5 является разработка и создания перспективных методов и средств дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли с борта микроспутника в лунной точке Лагранжа или из базы на поверхности Луны (исследование Земли как «звезды»). Постановкой данного проекта будет завершена разработка методики и создан комплекс новой научной аппаратуры: 1) низкодисперсные спектрофотометры НС для спектрофотометрии интегральных дисков Земли и Солнца в спектральном диапазоне 0.2—3 мкм с целью мониторинга изменения отражательной способности Земли и солнечной активности, которая позволит зарегистрировать изменение так называемой эффективной температуры Земли; 2) низкодисперсные спектрофотометры НС1 для спектрофотометрии интегрального диска Земли в диапазоне 3—40 мкм для выявления изменения мощности излучаемой Землей тепловой энергии; 3) среднелдисперсный спектрофотометр СФ для спектрофотометрии интегрального диска Земли в диапазоне 1—20 мкм для мониторинга измене-

ния химического состава атмосферы; 4) спектрополяриметр СП для спектрополяриметрии интегрального диска Земли в диапазоне длин волн 220—300 нм для изучения оптических свойств стратосферного аэрозоля.

Для исследования эффектов глобального потепления и изменения мощности озонового слоя мы предлагаем на один микроспутник в точке Лагранжа разместить вышеуказанный комплекс научной аппаратуры небольшого веса, и/или разместить его на лунной поверхности с возможностью работать в автономном режиме (лунный стационарный модуль или «ровер»), или полуавтономном (населенная лунная станция). Такие наблюдения могут проводиться как самостоятельно Украиной, так и в рамках международных программ сотрудничества с мировым сообществом. Стоимость такой программы будет невысокой, поскольку для ее реализации будет использовано изготовленную в Украине простую и дешевую научную аппаратуру с небольшими весовыми характеристиками. Стоимость таких приборов будет в 20—100 раз меньше зарубежных аналогов.

6. Создание фотополяриметра для дистанционного исследования физических характеристик стратосферного аэрозоля в атмосфере Земли с борта микроспутников.

Конечной целью проекта является создание перспективного метода и средства дистанционного исследования физических характеристик аэрозоля в стратосфере Земли с борта спутников, которые периодически запускаются на орбиту. Реализация проекта позволит получить новые наблюдательные данные, анализ которых даст возможность впервые определить значение действительной части показателя преломления и размеры стратосферного аэрозоля, величину оптической толщины, исследовать горизонтальную структуру аэрозольного стратосферного слоя и его изменение со временем. Для этого будет завершена разработка методики, разработка и изготовление новой научной аппаратуры — поляриметр на ультрафиолетовый участок спектра (УФП) на длины волн 230—280 нм.

Анализ этих данных позволит нам с высокой достоверностью провести моделирование процессов фотодиссоциации молекул разных газов с учетом ослабления интенсивности излучения Солнца газовой и аэрозольной составляющими в

верхних слоях земной атмосферы; это позволит более однозначно определить механизм появления озоновых дыр.

УФП при серийном производстве будет уже недорогим научным прибором, который можно размещать на разных космических аппаратах и постоянно проводить контроль одной из важных причин изменений озонового слоя земной атмосферы.

Все вышеперечисленные проекты могут быть логическим продолжением и расширением возможностей работ, которые выполняются в ГАО НАН Украины по реализации целевых программ Национальной космической программы Украины на 2003—2007 гг.

Выводы

Итак, несмотря на трудности, а в некоторых случаях и неоднозначность решения, можно отметить, что спектрополяриметрический метод является единственным дистанционным методом, который позволяет определять спектральные значения действительной части показателя преломления. Кроме того, по этим измерениям наиболее точно оцениваются параметры функции распределения частиц по размерам и оптическая толщина чисто газовых надоблачных слоев. Безусловно, что не менее успешным он окажется и при изучении физических характеристик поверхностных слоев для безатмосферных небесных тел. Для таких работ необходимы высокоточные поляризационные измерения, погрешность которых не будет превышать хотя бы величины 0.05 %.

1. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Гуральчук А. Л. и др. Астрономический спектрополяриметр. III. Информационно-измерительная и регистрирующая система // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Морозенко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 169—177.
2. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Кругов В. Д., Парусимов В. Г. Электрофотометр слабых потоков // Астрометрия и астрофизика 1968.—Вып. 1.—С. 193—210.
3. Бугаенко Л. А., Мельников М. А., Рагозина Л. Э., Самойлов В. С. Астрономический спектрополяриметр. II. Оптико-механический блок // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Морозенко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 164—168.

4. Бугаенко О. И., Галкин Л. С., Мороженко А. В., Поляриметрические исследования планет-гигантов. I. Распределение поляризации по диску Сатурна // *Астрон. журн.*—1971.—48, № 2.—С. 373—379.
5. Бугаенко О. И., Гуральчук Л. С. Астрономический спектрополяриметр. I. Основные принципы работы // *Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел* / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 160—164.
6. Ксанфомалити Л. В. Автоматический электронный поляриметр 1 ЭП 23 // *Уч. зап. Харьков. ун-та.*—1962.—122, Тр. Астрон. Обсерв.—14.—С. 91—99.
7. Кучеров В. А. Многокомпонентные симметричные ахроматические фазовые пластинки. I. Расширение панчаратнамовской системы на случай произвольного числа компонентов // *Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел* / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 152—160.
8. Кучеров В. А., Самойлов В. С. Суперахроматическая фазовая пластинка // *Оптико-мех. пром-сть.*—1987.—№ 9.—С. 57—58.
9. Мороженко А. В. Временные изменения поляризационных свойств света Юпитера // *Кинематика и физика небес. тел.*—1988.—4, № 1.—С. 54—59.
10. Lyot B. Recherches sur la polarization de la lumiere des planetes et de quegues substance terresteres // *Ann. Observatoire Meudon.*—1929.—8.—P. 1—161.
11. Pancharatnam S. M. Achromatic combinations of birefringent plates // *Proc. Indian Acad. Sci.*—1955.—A41.—P. 130—144.
12. Serkowski K. Polarimeters for optical astronomy // *Planets, Stars, and Nebular Studies with Photopolarimetry.* — Tucson: University of Arizona Press, 1974.—P. 135—174.

**SPECTROPOLARIMETRIC DEVICE FOR
OVERATMOSPHERIC INVESTIGATIONS
OF SOLAR SYSTEM BODIES**

*Ya. S. Yatskiv, A. P. Vidmachenko, A. V. Morozhenko,
M. G. Sosonkin, Yu. S. Ivanov, I. I. Syniavskiy*

We justify the advisability of the use of the spectropolarimetric device in preparation for and performance of the space experiments for global continuous long-term control of phenomena on the surface and in the atmosphere of the Earth, in circumterrestrial space, on the Moon, on solar system planets and on other bright celestial objects.