

А. П. Видьмаченко, Ю. С. Иванов,  
А. В. Мороженко, М. Г. Сосонкин

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

## Ультрафіолетовий спектрометр-поляриметр для планетного моніторинга на борту МКС

---

Формулюються основні вимоги до оптичної схеми спектрометра-поляриметра для планетних досліджень, призначеного для оснащення телескопа, розгортання якого ІКД РАН планує на борту Міжнародної космічної станції. Виходячи з поставлених завдань, розглянуті варіанти технічних рішень визначальних вузлів спектрометра-поляриметра. Запропоновано схему наведення телескопа на об'єкт і утримання об'єкта на діаграмі кожного з приладів, що входять у комплект наукової апаратури телескопа.

---

Вынесение астрономических наблюдений за атмосферу имеет своей целью повышение их эффективности за счет расширения доступного спектрального диапазона, увеличения пространственного разрешения, достижения большей регулярности и продолжительности рядов наблюдений.

Получение для планетных атмосфер и для безатмосферных тел Солнечной системы экспериментальных данных о спектральных зависимостях степени поляризации, отражательной способности и их временных изменениях в УФ-лучах с помощью внеатмосферных телескопов позволит определить спектральные значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, параметров функций распределения их по размерам и относительного (по отношению к газовой составляющей атмосферы) содержания аэрозоля, а также изучить механизмы, которые обеспечивает корреляцию изменений оптических и тепловых свойств планет с солнечной активностью.

В рамках совместного российско-украинского эксперимента в Главной астрономической обсерватории НАН Украины совместно с Институтом космических исследований РАН разрабатывается спектрометр-поляриметр на спектральный диапазон 240—400 нм. Прибор предназначается для оснащения телескопа, развертывание которого ИКИ РАН планирует на борту Международной космической станции. Основной задачей этих проектов

будет изучение тел Солнечной системы.

Основные сложности на пути создания прибора — это необходимость регистрации малых значений поляризации приходящего излучения, а значит — требование высокой точности определения потоков в большом динамическом диапазоне (до  $10^4$ ) интенсивности в спектрах излучения исследуемых объектов. Эти проблемы выдвигают достаточно жесткие требования к приемникам излучения и анализирующим элементам оптической схемы. В ГАО НАНУ наработан значительный опыт расчета, изготовления и эксплуатации высокоточных анализаторов поляризации, что будет способствовать реализации проекта.

К настоящему времени разработаны и рассчитаны варианты оптических схем прибора, удовлетворяющие требованиям космического эксперимента.

### ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

Основными особенностями поляризационных наблюдений являются требования высокого отношения сигнала к шуму и минимальных потерь света в приборе.

Измерения поляризации обычно проводятся или на многоканальных фильтровых поляриметрах, или на спектрополяриметрах на базе обычных спектро-

графов. Каждый из этих типов поляриметров имеет недостатки, снижающие его эффективность и существенно увеличивающие время измерения. Предлагаемый поляриметр свободен от недостатков обоих этих типов приборов. Основной особенностью этого инструмента является минимум оптических элементов, что резко снижает уровень энергетических потерь. Прибор позволяет одновременно измерять круговую и линейную поляризацию и яркость объекта в широком спектральном диапазоне.

При разработке прибора 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 — расширяют функцию рассеяния точки (ФРТ) до 40...50 мкм. Эти aberrации должны быть скорректированы (ФРТ не должна быть шире пиксела приемника).

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

Из отмеченного ясно, что каждый оптический элемент поляриметра должен выполнять максимальное количество силовых, поляриметрических и коррекционных функций одновременно. Поскольку

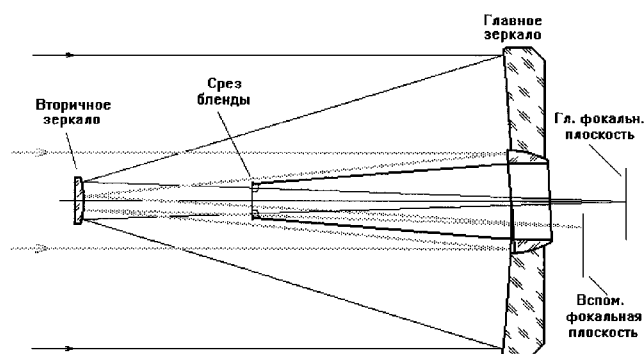


Рис. 1. Схема наведения и гидирования ПТ МКС с использованием части основного пучка

число свободных коррекционных параметров велико, их количество необходимо увеличивать не за счет наращивания числа элементов, а искусственно, путем введения наклонов и децентрировок [3].

Предлагается также использование суперхроматического фазосдвигающего В. Кучерова [2]. Это повысит эффективность поляризационного анализа во всей рабочей спектральной области прибора и исключит необходимость смены модуляторов для разных участков спектра и разных типов поляризации, как это делается в спектрополяриметре космического телескопа им. Хаббла (HST).

#### УСТАНОВКА ПРИБОРА НА ПТ МКС

Предварительные расчеты показали, что схема прибора определяется расположением анализирующего элемента, т. е. от схемы наведения и гидирования всего телескопа. На момент начала разработки эта схема не была определена. Были лишь сформулированы общие требования к расположению приборов (всего их четыре, включая спектрополяриметр). Поскольку эти приборы должны работать в различных диапазонах спектра, то входные блоки у них должны быть также различными, специфическими для каждого образца. Была предварительно проработана схема с общим входным отверстием и сложной механикой поочередного подключения каждого прибора. Однако вопросы наведения и гидирования решены не были.

Нами была предложена альтернативная схема наведения и гидирования (в том числе и оффсетного), которая позволяет оперативно переключать приборы без использования механических узлов (рис. 1).

В этой схеме основной пучок от объекта попадает в главную фокальную плоскость и далее — на один из приборов. Часть этого пучка (либо от вспомогательного наклонного зеркала, либо от прозрачных клиньев, установленных на срезе бленды) отклоняется и фокусируется на вспомогательной фокальной плоскости, расположенной вблизи задней крышки оправы главного зеркала (ГЗ). В этой плоскости установлены матрицы наведения. Расположив матрицы соответственно расположению входных отверстий, получим схему, в которой на каждый прибор можно устанавливать свое, специфическое, входное зеркало (блок).

На рис. 2 показаны: слева — вид на заднюю крышку оправы ГЗ со стороны ГЗ, справа — соответствующий разрез.

Расстояние  $D$  между осями входных отверстий (и между центрами соответствующих матриц) может

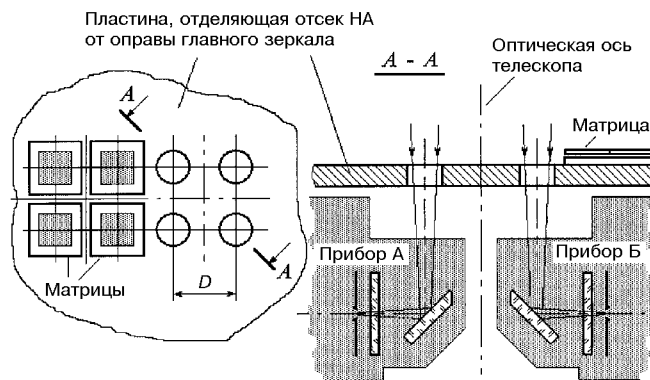


Рис. 2. Расположение матриц гидрирования и входных отверстий ПТ МКС

составлять 30...35 мм, что соответствует максимальному отклонению от оси телескопа 10...11'.

Как показывают расчеты, такое отклонение от оптической оси не приводит к заметному ухудшению качества изображений. Даже для стандартной, некоррегированной системы Ричи—Кретьена средний квадратичный радиус кружка рассеяния не превышает 3 мкм, т. е. меньше 0.1". Незначительная коррекция зеркал уменьшит эту величину еще в несколько раз.

**ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА**

**Анализатор.** Наиболее удобным и универсальным способом анализа поляризации излучения является преобразование степени поляризации вращающейся фазовой пластинкой в интенсивности лучей с ортогональной поляризацией. Величина и фаза изменений интенсивности несет информацию о компонентах вектора Стокса. Известно, что эффективность этого преобразования

$$E_n = \cos^2(d - d_0), \tag{1}$$

где  $E_n$  — коэффициент преобразования,  $d$  — фазовый сдвиг, вносимый фазовой пластинкой,  $d_0$  — номинальный фазовый сдвиг, соответствующий  $E_n = E_{nmax}$ .

Например, эффективность будет максимально возможной ( $E_{nmax} = 1$ ) для лучей линейной поляризации при  $d_0 = \pi/2$ , а для лучей круговой поляризации — при  $d_0 = \pi/4$ . Для прибора, предназначенного для анализа излучения произвольной поляризации, необходим компромиссный вариант:  $d_0 = 127^\circ$  с допустимым отклонением  $\pm 5^\circ$  и  $E_{nmax} = 0.71$ , или раздельное использование полуволно-

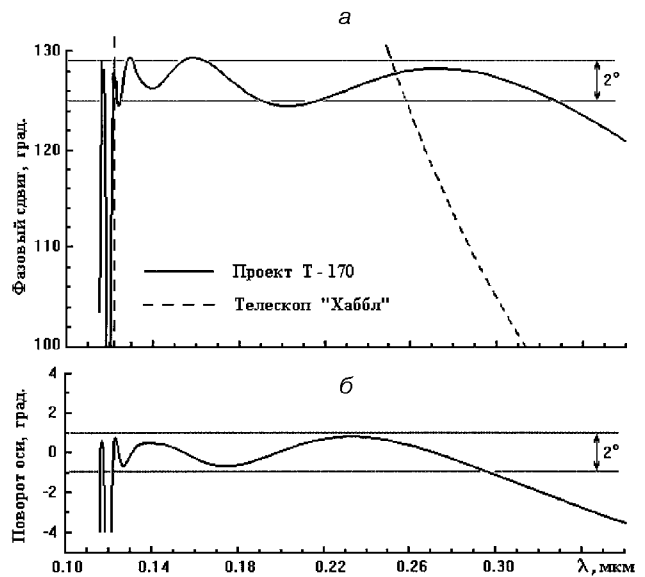


Рис. 3. Характеристики фазовых кристаллических суперахроматических пластинок конструкции В. Кучерова

вой или четвертьволновой фазовой пластинки, которые обеспечивают более высокую эффективность ( $E_n > 0.9$ ). Очевидно, высокоэффективный прибор должен иметь пластинку с малым значением  $d - d_0$  во всем рабочем спектральном диапазоне.

Такие фазовые пластинки были разработаны В. Кучеровым [2]. В своих пионерских работах В. Кучеров описал методику расчета и обосновал технологию изготовления суперахроматических термокомпенсированных фазовых пластинок, обеспечивающих постоянство фазового сдвига с отклонением менее  $3^\circ$  в широком спектральном диапазоне.

Предлагаемый ахроматический элемент представляет собой многокомпонентную фазосдвигающую систему с определенными толщинами и ориентациями оптических осей кристаллических слоев. Конструктивные параметры такой системы выбираются из условий самокомпенсации, а именно: при отклонении фазовых сдвигов отдельных компонентов от заданного, например вследствие изменения длины волны излучения, фазовый сдвиг системы и ориентация ее эквивалентной оптической оси не должны изменяться.

Пример расчета такой АФП показан на рис. 3. Здесь же для сравнения пунктирной линией обозначена часть спектральной зависимости фазового сдвига для одной из пластин поляриметра в спектрографе космического телескопа HST (левая ветвь этой зависимости соответствует области аномальной дисперсии фтористого магния).

Такой элемент по эффективности преобразования многократно превосходит фазовую пластину FOS телескопа HST. Отметим, что аномальная дисперсия фтористого магния на длинах волн  $\lambda < 130$  нм расширяет диапазон ахроматизации и приводит к появлению небольшой дополнительной рабочей зоны на длинах волн 116—118 нм, где кристалл превращается из положительного в отрицательный. Система легко пересчитывается на другие длины волн, и в требуемом диапазоне 200—400 нм отклонения фазового сдвига не превышают  $2^\circ$ , а отклонения ориентации оптической оси —  $0.75^\circ$ . Если принять приемлемыми допуски в два раза больше, то система будет успешно оптимизироваться в диапазоне 122—500 нм.

**Поляризатор.** В требуемом спектральном диапазоне поляризатор может быть только призмным. Из всего многообразия поляризационных призм по ряду причин могут быть использованы только призмы Волластона и Глана.

**Поляриметр с призмой Волластона.** Призма Волластона может быть установлена до входной щели или после нее. Она обладает собственной дисперсией и будет строить на щели (или прямо на приемнике, если она установлена после щели) два ортогонально поляризованных спектра, причем во втором варианте установки геометрические параметры расположения спектров в плоскости приемника, характер и масштаб дисперсии и величина абберационных искажений могут регулироваться выбором конструктивных параметров призмы [1, 3]. Этот вариант имеет следующие преимущества:

- элементы имеют предельно малые толщины, и следовательно, малые энергетические потери;
- одновременно используются спектры в обыкновенных и необыкновенных лучах, что не только способствует уменьшению погрешностей, но и позволяет ввести в процесс измерений самокалибровку прибора;
- призма имеет малые углы, что технологически облегчает деформацию ее поверхностей и позволяет упростить оптическую схему [1].

**Поляриметр с призмой Глана.** Призма Глана, в отличие от призмы Волластона, не диспергирует пучок, но, обладая намного большей толщиной по оси, вносит столь большие абберации, что необходимо использование корректора-компенсатора (рис. 4).

Большая толщина и усложненная схема приводят к потерям энергии. Поэтому использование призмы Глана оправданно лишь в панорамных поляриметрах, в которых спектральную информацию получают путем смены фильтров, что приводит к необходимости использования сложных механических уз-

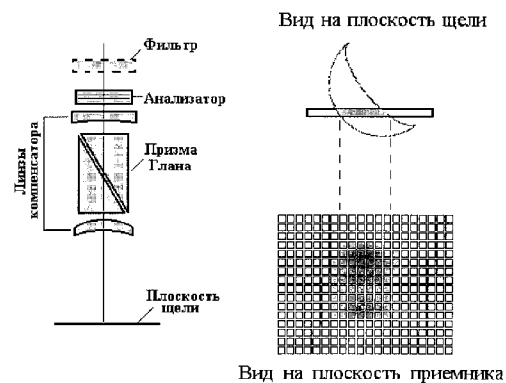


Рис. 4. Формирование спектра в поляриметре с призмой Глана

лов. Хотя потенциально такой прибор при ограниченном разрешении по спектру способен выдавать большие объемы информации (за счет панорамности), но с учетом усложнения оптики и механики, а также пониженной энергетической эффективности в бортовых приборах, работающих в УФ-диапазоне, использование таких схем нецелесообразно.

**Приемник.** В УФ-диапазоне могут работать следующие типы панорамных приемников: ПЗС-структуры, КМОП-структуры и многоанодные ФЭУ. Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор типа приемника должен быть обоснован комплексным анализом их параметров.

**Динамический диапазон.** Характерной особенностью УФ-излучения несамосветящихся тел Солнечной системы является большой динамический диапазон, доходящий до  $10^4$  (рис. 5).

С учетом того, что для достижения необходимой точности измерений нужен еще по крайней мере такой же запас, ясно, что необходима установка фильтра, плавно гасящего избыток длинноволнового излучения. Однако даже после такой фильтрации динамический диапазон останется критически большим, и этот параметр будет во многом определять выбор конкретного приемника.

**Квантовая эффективность и спектральная чувствительность.** По этим параметрам выделяются два типа приемников: ПЗС-матрицы с обратной подсветкой и многоанодные ФЭУ (см. рис. 6, 7). Эти же типы приемников имеют динамический диапазон более  $10^4$ .

Хотя квантовая эффективность у ПЗС-матриц выше, но они обладают шумами переноса, а для ФЭУ характерно большое внутреннее усиление при практическом отсутствии шумов, так что эти типы приемников приблизительно равноценны по соот-

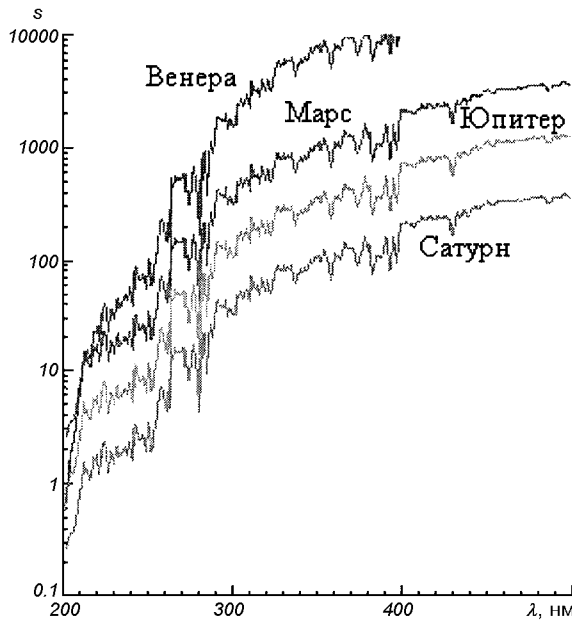


Рис. 5. Спектральная плотность  $s$  излучения планет на элемент разрешения в УФ-диапазоне

ношению сигнал/шум, и дальнейший выбор должен производиться по эксплуатационным характеристикам, подтвержденным результатами испытаний (термическим, механическим, радиационным и пр.), а также исходя из гарантированного ресурса.

**Диспергирующий блок.** В качестве диспергирующего элемента может быть использована либо диффракционная решетка, либо призма. Однако по энергетической эффективности решетки, даже голографические, хуже призм (особенно на краях диапазона), и, что более существенно — разность их коэффициентов отражения в О- и Е-лучах велика (доходит до 50 %), неравномерна по спектру и нестабильна во времени. Даже частые калибровки, занимающие заметную часть наблюдательного времени, не смогут полностью компенсировать возникающие погрешности. Для призм эта разность также характерна, но она меньше, ее ход монотонен по спектру и стабилен во времени. Следовательно, с учетом невысокого требуемого разрешения по спектру в качестве диспергирующего элемента наиболее целесообразно использование призм.

Для призм характерна существенно неоднородная дисперсия по спектру — коротковолновый участок спектра, в котором и без того содержится мало энергии, будет растянут в несколько раз сильнее длинноволнового, что усугубляет проблему динамического диапазона приемника. Однако при невысоком разрешении по спектру, и следовательно, небольших углах призмы, возможна компенсация

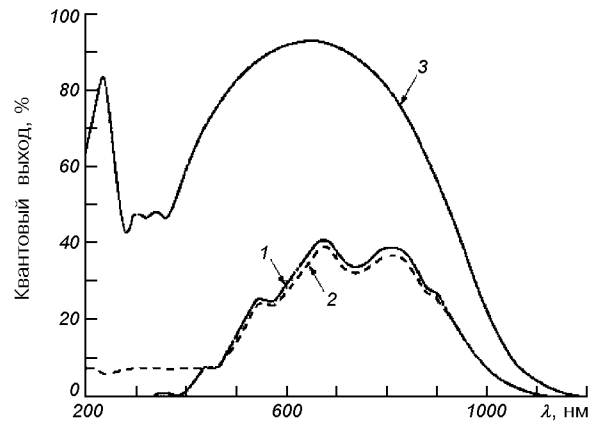


Рис. 6. Спектральные характеристики ПЗС-матрицы

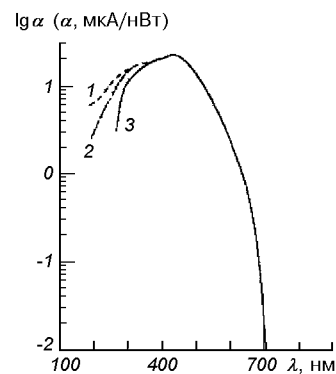


Рис. 7. Спектральные характеристики мультианодных ФЭУ

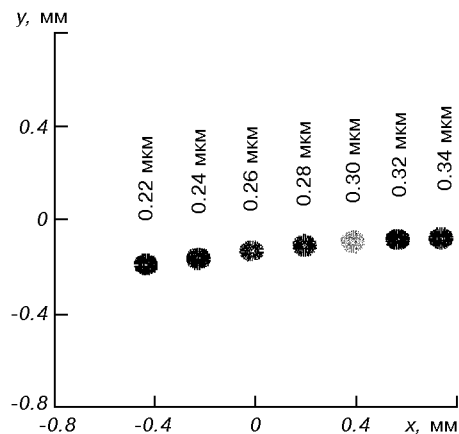


Рис. 8. Точечная в плоскости изображения диаграмма системы с композитной призмой  $MgF_2$  — КУ1 для длин волн от 0.22 до 0.34 мкм

этой неравномерности подклейкой компенсирующего клина из материала с другой дисперсией [1]. Пример такого решения для УФ-диапазона ( $MgF_2$  — кварцевое стекло КУ1) приведен на рис. 8.

Такой прием позволяет управлять дисперсией системы произвольным образом. Например, для

снижения нагрузки на динамический диапазон приемника можно растянуть «красный» участок спектра и сжать «синий», и с учетом спектральных характеристик приемника и фильтра осуществить дополнительное выравнивание спектральной чувствительности системы в целом.

Расчеты показывают, что предлагаемая схема обеспечивает высокое качество изображения. Почти для всего спектрального диапазона размеры пятен не превышают размеров пикселей матрицы (25×25 мкм). Спектральное разрешение может быть от нескольких единиц до сотен.

Ряд новых технических решений позволит преодолеть ограничения предыдущих космических инструментов для измерений поляризации в ультрафиолете, что делает этот прибор конкурентноспособным на годы вперед.

1. Гершберг Р. Е., Ефимов Ю. С., Иванов Ю. С. Высокоэффективный УФ-спектрополяриметр // Ультрафиолетовая Вселенная. — М.: ГЕОС, 2001.—С. 47—55.

2. Кучеров В. А. Ахроматический фазосдвигатель для вакуумного ультрафиолета // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 1.—С. 52—58.
3. Kucherov V. A., Ivanov Yu. S., Efimov Yu. S., et al. Ultraviolet low-resolution spectropolarimeter for the space mission Spectrum-UV // Space Science and Technology. Suppl.—1997.—3, N 5/6.—P. 3—27.

---

#### UV SPECTROMETER-POLARIMETER FOR PLANETARY MONITORING ABOARD THE ISS

A. P. Vid'machenko, Y. S. Ivanov, A. V. Morozhenko,  
and M. G. Sosonkin

The basic requirement for the optical circuit of spectrometer-polarimeter for investigation of planets are stated. The spectrometer-polarimeter is intended for the equipment of the telescope which is planned to be placed aboard the International Space Station by the ISR of RAS. Based upon the formulated tasks, we discuss the variants for the technical decisions of the spectrometer-polarimeter determining units. We propose the circuit for setting the telescope on an object and following the object with the aperture of each devices included in the complete set of the telescope scientific equipment.