

О. В. Мороженко, А. П. Відьмаченко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Задачі спектрополяриметричного експерименту на Міжнародній космічній станції

Розв'язання ряду задач з фізики газово-аерозольного шару планетних атмосфер планується здійснити з борту Міжнародної космічної станції в рамках комплексної програми «Планетний моніторинг», яку реалізує Інститут космічних досліджень АН Російської Федерації. За домовленостями між ІКД РАН та ГАО НАН України та погодженням Космічних агентств Росії та України українська сторона розробляє та поставляє УФ-спектрополяриметр, що є складовою згаданої космічної програми. В роботі надається перелік основних наукових задач, які можуть бути розв'язані на основі спостережних даних в УФ-ділянці спектру: 1) визначення спектральних значень комплексного показника заломлення хмарових частинок; 2) вивчення природи фотометричних деталей дисків планет з потужними атмосферами; 3) моніторинг довгоперіодичних змін оптичних характеристик планетних атмосфер та визначення можливого механізму їхньої появи; 4) розв'язання проблеми сильнопоглинаючих частинок Акселя, яким приписуються ефекти УФ-поглинання в планетних атмосферах; 5) дослідження потужності водневої атмосфери комет; 6) встановлення причин зміни потужності озонового шару та температурного режиму в глобальних масштабах Землі; 7) уточнення даних про спектральні значення уявної частини показника заломлення марсіанського аерозолю, його оптичної товщини та ефективного радіуса частинок.

ВСТУП

Серед дистанційних методів досліджень лише спектрополяриметрія дозволяє з високою мірою достовірності визначати величину комплексного показника заломлення та параметрів функції розподілу за розмірами хмарових частинок в планетних атмосферах. Характерною властивістю цього методу є те, що спектральні значення другого параметра Стокса $Q(\alpha)$ (α — фазовий кут), який рівний добутку видимого альбедо планети $A(\alpha)$ на ступінь лінійної поляризації $P(\alpha)$ дифузно відбитого нею світла, головним чином визначається ефектами однократного розсіяння світла [14]. Завдяки цьому ще в середині двадцятих років минулого сторіччя Ліо [24], порівнюючи отриману ним фазову залежність ступеня поляризації світла диску Венери з вимірами в лабораторних умовах $P(\alpha)$ для водяних крапельок, прийшов до висновку, що радіус хмарових частинок приблизно рівний 1 мкм. Як не парадоксально, але проведений вже в 1970-х рр. аналіз спектральних фазових залежностей поляризації зі строгим врахуванням багатократного

розсіяння підтвердив, що дійсно ефективний радіус частинок становить 1.05 мкм. Принципово новим в цій роботі було лише визначення дисперсії розмірів частинок (0.07) та спектральних значень дійсної частини показника заломлення $n_r \approx 1.44$ на $\lambda = 900$ нм та 1.46 — в короткохвильовій ділянці спектру [20]. Про чутливість характеру фазової залежності $P(\alpha)$ свідчить рис. 1, який взято з роботи [20].

Пізніше такі оцінки були зроблені також для хмарових частинок атмосфер Марса [6, 10], Юпітера [25] та Сатурна [1]. Доцільно зауважити, що при відсутності спостережних даних про фазові залежності поляризації непогані результати дає аналіз спектральної залежності параметра $Q(\alpha)$ в досить широкому інтервалі довжин хвиль при окремих значеннях фазового кута. Відзначимо, що пряме зондування атмосфери Венери лише уточнило згадані вище характеристики хмарових частинок [23].

Крім оцінок вказаних параметрів хмарових частинок, спектрополяриметрія має важливе значення і при вивченні деяких інших властивостей газово-аерозольного шару планетних атмосфер. Перелічимо їх.

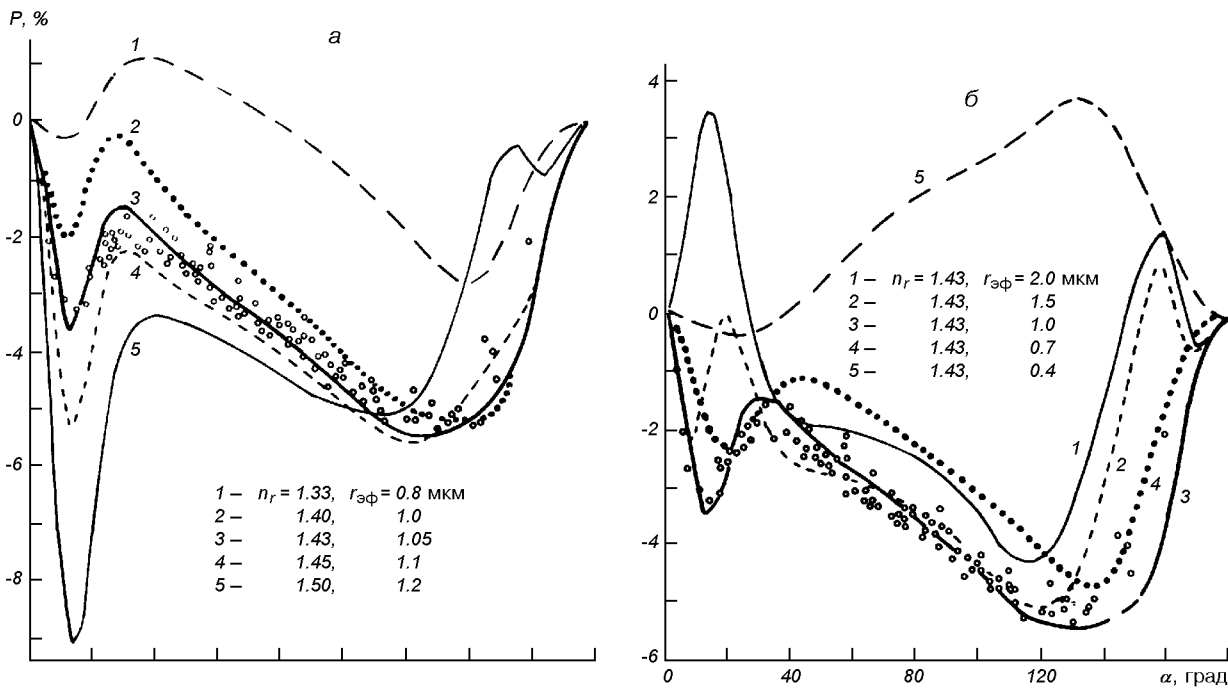


Рис. 1. Спостережна фазова залежність поляризації Венери (світлі кружки) та результати розрахунків: при різних значеннях дійсної частини показника заломлення та середнього радіуса частинок (а), лише середнього радіуса (б)

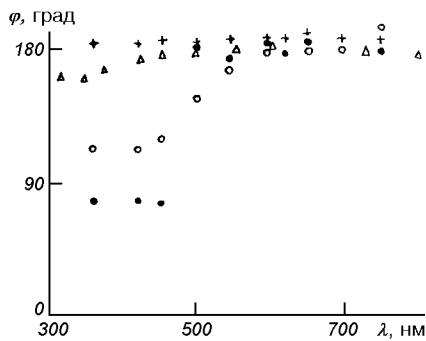


Рис. 2. Спектральна залежність положення площини поляризації світла Сатурна для західного (світлі кружки) та східного (темні кружки) приекваторіальних районів, центра диску (трикутники) та південного полярного району (хрестики)

1. Визначення положення площини поляризації, а вірніше, міри її відхилення від положення площини розсіяння чи радіуса-вектора планети (рис. 2) дозволяє виявляти наявність орієнтованих частинок у верхніх шарах атмосфери. Це було доведено роботами з вивчення поляризаційних властивостей деталей диску Сатурна [2].

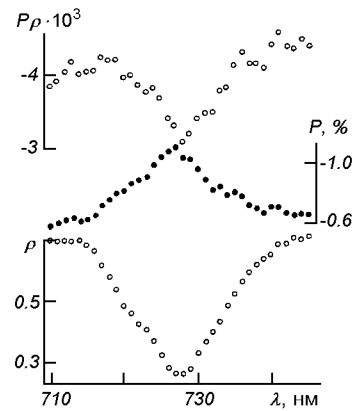


Рис. 3. Спектральна залежність відбивної здатності (темні кружки), ступеня поляризації (світлі кружки внизу) та добутку цих параметрів (світлі кружки вгори) в смузі поглинання на 727 нм в центрі диску Юпітера

2. Спектрополяриметрія в контурах смуг поглинання метану лише в центрі диску планети (рис. 3) дозволяє з великою точністю визначати кількість метану в надхмаровому шарі [7]. При цьому із спостережень необхідно отримати значення ступеня поляризації світла в центрі смуги поглинання $P_v(\mu_0)$ та в неперервному спектрі $P_c(\mu_0)$, а також

залишкову інтенсивність $R_v(\mu_0)$ в центрі смуги поглинання; визначення кількості метану NL на промені зору здійснюється за формулою

$$NL = -[\mu_0 / (1 + \mu_0) k_v] \cdot \ln [P_v(\mu_0) / (P_c(\mu_0) \cdot R_v(\mu_0))],$$

де k_v — значення монохроматичного коефіцієнта поглинання, μ_0 — косинус кута падіння світла.

В подальшому було показано, що такі спостереження світлих та темних поясів диску Юпітера, а також їхня спектрополяриметрия в УФ-променях ($\lambda < 450$ нм) дозволяють визначити різницю положення верхньої межі хмарових шарів над цими деталями (приблизно $0.8H_g$, де H_g — шкала висот газової складової атмосфери), та оптичної товщини газової складової в надхмаровому шарі, а отже, і значення тиску на верхніх межах хмарового шару (приблизно 40 кПа над Екваторіальною Зонаю) [11].

3. Спектрополяриметрия світла від усього диску планети при близьких до нуля значеннях фазового кута дозволяє визначити наявність оптичної неоднорідності диску планети, яка може бути зумовлена багатьма факторами (різною концентрацією хмарових частинок або вертикальною структурою хмарового шару, різною природою частинок або їхніх розмірів для різних ділянок диску планети та інше) [11]. Це особливо важливо для вивчення планет, диски яких мають малі кутові розміри.

4. Вивчення причин зміни в часі оптичних характеристик планет. Прикладом цього можуть бути дослідження 4-добових варіацій ступеня поляризації Венери (рис. 4) та причин, які їх зумовлюють [12]. Зараз практично ні в кого не виникає сумнівів у наявності кореляції довгоперіодичних змін оптичних характеристик планет з циклом сонячної активності. Особливо разучі приклади довгоперіодичних змін показують фотометричні спостереження Юпітера [3, 4]. Про це свідчать визначення зіркової величини диску Юпітера у візуальних променях в період з 1860 до 1995 р. (рис. 5). На відміну від цього, чотирьохдобові зміни на Венері приписуються існуванню глобальної асиметрії основного хмарового шару [15] та зміні оптичної товщини надхмарового туману [12]. Після відкриття значних варіацій потужності сонячного випромінювання в далекій УФ-ділянці спектру [16] деякі дослідники стали пов'язувати ці зміни із впливом жорсткого УФ-випромінювання на поглинальні властивості аерозоля у верхніх шарах атмосфери. Поки що залишається відкритою і проблема так званих субмікронних часток Акселя [17] у верхніх шарах атмосфери.

5. Вважаємо за доцільне окремим пунктом винести проблеми глобальних змін потужності озоново-

го шару та теплового режиму на Землі. Всупереч загальноприйнятому допущенню, що зменшення концентрації стратосферного аерозолю зумовлене різноманітними фреонами, зараз переконливо [13] показано, що це можна пояснити збільшенням потужності аерозольного забруднення у верхніх шарах атмосфери. Більше того, зараз вже немає

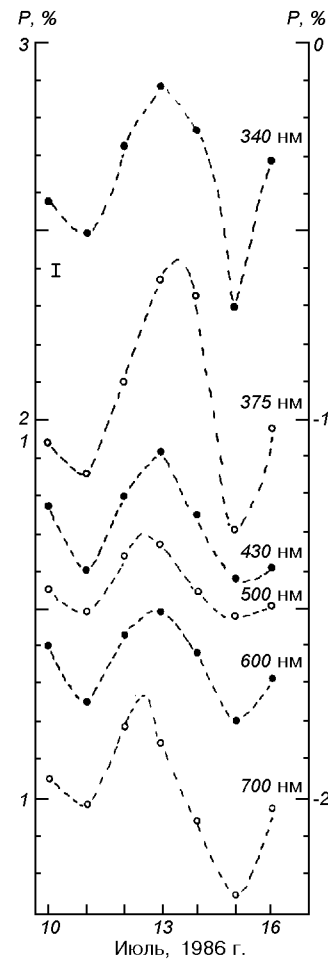


Рис. 4. 4-добові зміни ступеня поляризації світла всього диску Венери в різних довжинах хвиль



Рис. 5. Довгоперіодичні зміни блиску диску Юпітера (кружки) у візуальних променях в період з 1860 до 1963 р. і Марса (хрестики)

сумнівів, що варіації потужності стратосферного аерозолу впливають також і на тепловий режим Землі в глобальних масштабах. На жаль, на сьогодні зовсім немає інформації про спектральні значення комплексного показника заломлення та параметри функції розподілу цих частинок за розмірами.

6. Спектрополяриметрія відіграє важливу роль і у вивченні безатмосферних небесних тіл. Найхарактернішим прикладом може бути виявлення оптичної неоднорідності поверхні цих тіл. Справа в тому, що на відміну від фотометричних досліджень, коли варіації блиску можуть бути зумовлені не лише наявністю на диску деталей з різними оптичними властивостями, але й несферичною формою тіла, — зміна ж поляризаційних властивостей зумовлена головним чином оптичною неоднорідністю диску [8].

Зараз непогано вивчені не лише поляризаційні властивості планет, але й накопичені численні дані багаторічних спостережень для видимої ділянки спектру. Що стосується далекого ультрафіолету, то тут лише для Венери космічним апаратом «Піонер-Венера» було отримано великий обсяг інформації [21, 22], але він обмежується однією довжиною хвилі в $\lambda = 268$ нм. Для Марса, наскільки нам відомо, зараз опубліковані лише два спостереження: в 1969 р. було виміряно ступінь поляризації на довжині хвилі $\lambda = 225$ нм при фазовому куті 25.4° [18], та в 1995 р. проведено спектрополяриметричні дослідження в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 210\text{—}1020$ нм при фазовому куті 21.7° [19]. Для Юпітера та Сатурна, не говорячи вже про інші планети, таких досліджень зовсім немає. В той же час існує цілий ряд задач, які можуть бути розв'язані або лише на основі даних в УФ-ділянці спектру, або з обов'язковим їхнім долученням до відповідних експериментальних даних у видимій ділянці спектру. Така ж ситуація має місце і для Землі.

ЗАДАЧІ УФ-СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРІЇ ТА ВИСНОВКИ

Незважаючи на досягнуті значні успіхи у вивченні фізичних властивостей планетних атмосфер Сонячної системи, ще й зараз їх можна розглядати лише як перше наближення. Не претендуючи на повноту, нижче перерахуємо основні наукові задачі, для дослідження яких спектральний діапазон необхідно розширити в далеку УФ-область.

1. Визначення спектральних значень комплексного показника заломлення хмарових частинок.
2. Вивчення природи фотометричних деталей дисків планет з потужними атмосферами.
3. Моніторинг довгоперіодичних змін оптичних

характеристик планетних атмосфер та визначення можливого механізму їхньої появи.

4. Розв'язання проблеми сильнопоглинаючих частинок Акселя, яким приписуються ефекти УФ-поглинання в планетних атмосферах.

5. Дослідження потужності водневої атмосфери комет.

6. Встановлення причин зміни потужності озонового шару та температурного режиму в глобальних масштабах Землі.

7. Уточнення даних про спектральні значення уявної частини показника заломлення марсіанського аерозолу, його оптичної товщини та ефективного радіуса частинок. Нагадаємо, що між оцінками цих параметрів, отриманими різними методами, зараз мають місце великі розбіжності, які інколи досягають 10—20 разів [5].

Для розв'язання цих задач необхідно отримати спостережні дані про спектральні залежності ступеня поляризації та відбивної здатності в контурах потужних смуг поглинання метану та в далекій УФ-ділянці спектру у максимально широкому інтервалі фазових кутів. Саме це і планується здійснити з борту Міжнародної космічної станції в рамках комплексної програми «Планетний моніторинг», який реалізує Інститут космічних досліджень АН Російської Федерації. За домовленостями між ІКД РАН та ГАО НАН України та погодженням з космічними агентствами Росії та України українська сторона розробляє та поставляє спектрополяриметр, який ввійде як одна зі складових згаданої космічної програми. На рис. 6 показано блок-схему спектрополяриметра, який мусить задоволь-

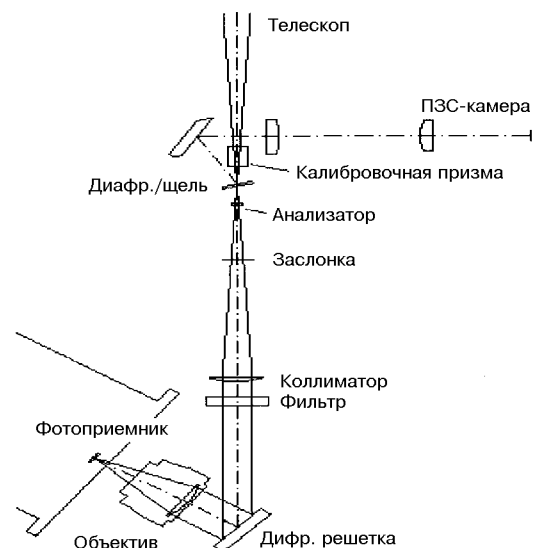


Рис. 6. Схема УФ-спектрополяриметра на борту МКС

Параметри зірок з майже нульовою поляризацією

HD	Зірка	α	δ	v	P, %
432	β Cas	$0^h 07.8^m$	+59°01'	2.2	0.009 ± 0.009
38396	γ Lep A	5 43.5	-22 27	3.6^m	005 ± 8
61421	α Cmi	7 38.1	+5 19	0.3	005 ± 9
198149	η Cep	20 44.8	+61 44	3.4	006 ± 5
210027	i Peg	22 05.9	+25 13	3.8	002 ± 6
216956	α Ps A	22 56.0	-29 45	1.2	006 ± 9

няти наступні вимоги:

- світлосила 1/8;
- спектральний інтервал, в залежності від приймача випромінювання, знаходиться у межах $\lambda\lambda = 220...300$ чи $220...450$ нм;
- спектральна роздільна здатність, в залежності від вибраного приймача випромінювання, буде становити від 1 до 20 нм;
- похибка визначення параметрів лінійної поляризації має бути не більшою 0.1 % (при наявності необхідного відношення сигнал/шум), а відбивної здатності — 5 %.

Для дослідження інструментальної поляризації системи «телескоп + спектрополяриметр» нічого кращого не залишається, як вважати, що світло зірок-стандартів з практично нульовою поляризацією у видимому діапазоні довжин хвиль неполяризоване також і в УФ-променях [26]. В таблиці наводимо перелік зірок з майже нульовою поляризацією.

Практично нульова лінійна поляризація властива також для Веги (α Lyr), яка поряд з α Смі є найзручнішою для дослідження інструментальної поляризації в режимі спектрополяриметра.

Значно складніша справа з метрологією великих значень поляризації, тому що часто використовуваний апроксимаційний вираз

$$P(\lambda)/P(\lambda_{\max}) \approx \exp[-1.15 \cdot \ln^2(\lambda_{\max})]$$

для поляризованого міжзоряним середовищем світла навряд чи справедливий. Через це в склад спектрополяриметра в обов'язковому порядку має бути включене джерело з високою поляризацією (100 %-й поляризатор чи щось інше).

1. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра // Астрон. вестн.—1975.—9, № 1.—С. 13—21.
2. Бугаенко О. И., Мороженко А. В. Ориентированные частицы в верхних слоях атмосферы Сатурна. Физика планетных атмосфер. — Киев: Наук. думка, 1981.—С. 108—112.
3. Видьмаченко А. П., Стеклов А. Ф., Миняйло Н. Ф. О возможном периоде активности на Юпитере. Сезоны? //

- Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 9.—С. 691—695.
4. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников // Планеты и спутники / Под ред. Д. Койпер. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.—С. 241—305.
 5. Длугач Ж. М., Мороженко А. В. Аэрозоль в марсианській атмосфері // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 5.—С. 437—453.
 6. Дольфюс А., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. II. Пылевые бури // Астрон. вестн.—1974.—8, № 4.—С. 211—222.
 7. Кучеров В. А., Мищенко М. И., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия в полосах поглощения метана и вертикальная структура планетных атмосфер // Письма в Астрон. журн.—1990.—14, № 9.—С. 835—839.
 8. Лупишко Д. Ф., Бельская Н. Н., Кварцхелия О. И. и др. Поляриметрия Весты в противостоянии 1986 г. // Астрон. вестн.—1988.—22, № 1.—С. 142—146.
 9. Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. III. Юпитер // Астрон. журн.—1973.—50, № 1.—С. 163—166.
 10. Мороженко А. В. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. I. Аэрозольная составляющая чистой атмосферы // Астрон. вестн.—1974.—8, № 3.—С. 121—127.
 11. Мороженко А. В. Зоны и полосы Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестн.—1990.—24, № 3.—С. 211—220.
 12. Мороженко А. В. Короткопериодические изменения поляризационных свойств излучения Венеры. Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 4.—С. 22—36.
 13. Мороженко О. В., Шаврина В. В., Вельсь О. О. Роль стратосферного аэрозоля у формировании озонового слоя // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 364—368.
 14. Соболев В. В. Исследование атмосферы Венеры. II // Астрон. журн.—1968.—45, № 1.—С. 169—176.
 15. Фомин Н. Н., Яновицкий Э. Г. Глобальные вариации оптической толщины атмосферы Венеры. II. Анализ поведения эквивалентных ширин линий CO₂ для модели неоднородной атмосферы // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 4.—С. 30—42.
 16. Хит Д. Ф., Текаекара М. П. Солнечный спектр в области 1200—3000 Å // Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О. Уайт. — М: Мир, 1980.—С. 212—232.
 17. Axel L. Inhomogenous models of the atmosphere of Jupiter // Astrophys. J.—1972.—173, N 2.—P. 451—468.
 18. Coffen D. L., Gehrels T. Ultraviolet polarimetry of planets // Planet. and Space Res.—1970.—10, N 1.—P. 1—7.
 19. Fox G. K., Code A. D., Anderson C. M., et al. Solar system observations by the Wisconsin Ultraviolet Photopolarimeter Experiment. I. The first ultraviolet linear spectropolarimetry of Mars // Astron. J.—1997.—113, N 3.—P. 1152—1157.
 20. Hansen J. E., Hovenier J. W. Interpretation of the polarization of Venus // J. Atmos. Sci.—1974.—31, N 4.—P. 1137—1160.

21. Kawabata K., Coffeen D. L., Hansen J. E., et al. Cloud and haze properties from Pioneer Venus polarimetry // *J. Geophys. Res.*—1980.—85, N A13.—P. 8129—8140.
22. Knibble W. J. J., de Haan J. F., Hovenier J. W. Analysis of temporal variations of the polarization of Venus observed by Pioneer Venus orbiter // *J. Geophys. Res.*—1998.—10, N E4.—P. 8557—8574.
23. Knollenberg R. G., Hunten D. M. The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1980.—85, N A13.—P. 8039—8058.
24. Lyot B. Recherches sur la polarization de la lumiere des planetes et de quelques substance terrestres // *Ann. Observ. Meudon.*—1929.—8.—P. 1—161.
25. Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus.*—18.—1971, N 4.—P. 583—592.
26. Serkovski K. Polarimeters for optical astronomy // *Planets, Stars and Nebula with photopolarimetry* / Ed. T. Gehrels. — 1974.—P. 135—174.

TASKS OF THE SPECTROPOLARIMETRIC EXPERIMENT ABOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

O. V. Morozhenko and A. P. Vid'machenko

We list the main scientific tasks which can be solved aboard the ISS on the basis of UV-polarimetric observations. The tasks are the following: 1) the determination of spectral values of the complex refractive index of cloud particles; 2) the investigation of the nature of photometric details of discs of planets with thick atmospheres; 3) the monitoring of the long-period changes of optical properties of planetary atmospheres and the elucidation of the possible mechanism of the occurrence of the changes; 4) solving the problem of strong-absorbing Axel particles to which the effects of the UV-absorption in planetary atmospheres are attributed; 5) the investigation of the thickness of hydrogen atmospheres of comets; 6) the elucidation of the causes of variations of the ozone layer thickness and temperature conditions on a global scale; 7) the improvement of the spectral values of the imaginary part of the refractive index of the martian aerosol and its optical thickness, as well as the effective radius of particles.