

Тщательный анализ приведенных наблюдательных данных и результаты их интерпретации позволяют сделать вывод о том, что имеющаяся на сегодня инструментальная база и наш опыт в изготовлении спектрополяриметрической аппаратуры может быть успешно использован при подготовке и осуществлении научной программы космического эксперимента «Лунный орбитальный модуль».

Представленная работа выполняется при частичной финансовой поддержке Национального космического агентства Украины (контракт «АСТРО») и Научно-технологического центра в Украине (грант NN43).

1. Кварцхелия О. И. Зависимость степени поляризации отраженного Лунной света от угла фазы // Сообщения АН ГрузССР.—1983.—112, № 2.—С. 293—296.
2. Мороженко А. В. О минералогическом картировании лунной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1983.—1.—С. 86—92.
3. Dollfus A., Bowell E. Polarimetric properties of the lunar surface and its interpretation. Part 1. Observations // Physique du systeme solaire. — Medon, Observatoire de Paris, 1969.—64 p.
4. Korokhin V. V., Velikodsky Yu. I. Parameters of the maximum positive polarisation of the Moon // 35th Lunar and Planetary Sci. Conf., March 15—19, 2004, League City, Texas. — League City, 2004.—Abstract n. 1306 (2P.)
5. Peterson C. A., Hawke B. R., Lucey P. G., et al. The Distribution of Anorthosite on the Lunar Farside // Workshop on New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999.—P. 46.
6. Pieters C. M. Mineralogy of the Moon: How did we start? What

did we find? Where are we going? // American Geophysical Union, Fall Meeting 2002. — 2002.—Abstract #P51C-03.

7. Pinori S., Bellucci G. Regional Dark Mantle Deposits on the Moon: Rima Bode and Sinus Aestuum Analysis // Workshop on New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999.—P. 49.
8. Sasaki S., Iijima Y., Tanaka K., et al. Scientific Research in the Lunar Orbiting Mission // IAF abstracts. 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, held 10-19 Oct., 2002 in Houston, TX, USA. — 2002.—P. Q-4-3-04.

MAPPING OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MOON'S SUPERFICIAL LAYER AND ULTRA-VIOLET POLARIMETRY FROM A LUNAR ORBITAL STATION

A. P. Vid'machenko, A. V. Morozhenko

Ground and space researches of the Moon allowed one to carry out large-scale mapping of its superficial layer. Morphological details of the Moon have various spectral reflective properties. Their characteristic features are decrease of its reflectivity from visual spectral region to ultra-violet one and absorption bands in near infra-red spectral region. This points to mineralogy of the Moon's surface. Morphological features with different optical and physical properties have different polarization. In the long-wave spectral region, the degree of polarization is practically identical for many details on the Moon's surface, but its values differ strongly in ultra-violet region. The phase curve in ultra-violet region allows one to determine the value of phase angle α_{\max} at which the maximal value of degree of polarization P_{\max} takes place, with error less than 1° . These optical parameters of the Moon's surface enable us to determine refraction indexes of its mineral particles, i. e., to make mapping of the Moon's minerals.

УДК 523.4

© Є. П. Неводовський, А. П. Відьмаченко,
О. В. Мороженко, П. В. Неводовський, І. І. Синявський

Головна астрономічна обсерваторія НАН Україна, Київ

УКРАЇНСЬКИЙ МОЛОДІЖНИЙ СУПУТНИК: ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОЗОЛЬНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ ЗЕМЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ УФ-ПОЛЯРИМЕТРА

Розглядаються механізми змін концентрації стратосферного озону у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км). Пропонується проект бортового УФ-поляриметра на довжину хвилі $\lambda \approx 250$ нм для українського молодіжного супутника. Реалізація поданого проекту дозволить отримати спостережні дані, аналіз яких дасть змогу з високою достовірністю визначити значення комплексного показника заломлення, а також розмір частинок, горизонтальну структуру аерозольного шару і дослідити імовірну її зміну в часі.

ВСТУП

Останні десятиріччя минулого століття для землян позначились такими катастрофічними явищами, як появою озонових дірок в атмосфері. Була висунута

гіпотеза, що основним чинником цього явища є фреони. Тому Міжнародні угоди (Женевська конвенція про глобальний перенос забруднювальних домішок та відповідний Протокол до неї про обмеження викидів оксидів азоту, Віденська конвенція

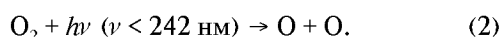
про захист озонового шару, Монреальський протокол про обмеження та заборону виробництва озононебезпечних хлорфторвуглеводнів) було спрямовано на боротьбу з фреонами як головними руйнівачами озоносфери. Однак в кінці 1990-х років було висунуто гіпотезу, згідно з якою зменшенню концентрації стратосферного озону сприяє збільшення аерозольного забруднення у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км).

Нагадаємо, що основним механізмом утворення озону є реакція потрійних зіткнень атомарного та молекулярного кисню

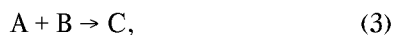


де M — довільна третя молекула, яка стабілізує проміжні продукти реакції та збалансовує кінетичну енергію та енергію імпульсу.

Основним джерелом атомарного кисню є дисоціація молекули кисню в ході реакцій фотодисоціації



Така реакція починається у випадку, коли енергія фотона досягне деякого порогового значення $h\nu_0$. Для молекули кисню на довжині хвилі $\lambda < 242 \text{ нм}$ ця енергія дорівнює 5.117 еВ. Крім того, відзначимо, що дисоціація може проходити в процесі реакцій двокомпонентних та трикомпонентних зіткнень молекул:



де A, B, M — молекули реакцій зіткнень, C — молекула, утворена в процесі реакцій зіткнень.

Реакція (2) означає, що в залежності від енергії поглинутого фотона, молекула A або переходить у збуджений стан A^* , який може бути обертовим, коливальним чи електронним, або буде відповідати умовам, при яких відбуваються процеси дисоціації чи іонізації молекули. Швидкість утворення збуджених молекул визначається рівнянням

$$\frac{d[A^*]}{dt} = [A] \int_{\nu_0}^{\infty} I_{\nu} \exp\left[-\frac{(\tau_o^g(\nu) + \tau_o^a(\nu))}{\mu}\right] \alpha_{\nu} d\nu \equiv [A]J$$

де $[A^*]$ та $[A]$ — об'ємні концентрації збуджених та незбуджених молекул відповідно, I_{ν} — інтенсивність сонячного випромінювання на верхній межі атмосфери, ν_0 — частота, яка відповідає пороговій енергії фотона, при якій починається реакція фотодисоціації, $\tau_o^g(\nu) = \tau_p^g(\nu) + \tau_n^g(\nu)$ та $\tau_o^a(\nu) = \tau_p^a(\nu) + \tau_n^a(\nu)$ — оптичні товщини газової та аерозольної складових атмосфери, а індекси «р» та «п» означають розсіювальні та поглинальні складові оптичної

товщини, α_{ν} — монохроматичний коефіцієнт поглинання газу, J — коефіцієнт швидкості фотодисоціації, μ — синус висоти Сонця над горизонтом. Наскільки нам відомо, до цього часу у відповідних розрахунках враховувалась лише газова складова атмосфери, тобто вважалось, що $\tau_o^a(\nu) = 0$.

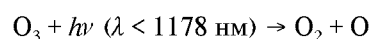
Швидкість двокомпонентних (3) та трикомпонентних (4) реакцій визначається як

$$\frac{d[C]}{dt} = [A][B]k_{AB},$$

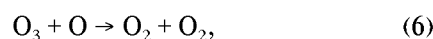
$$\frac{d[C]}{dt} = [A][B][M]k_{ABM},$$

де k_{AB} і k_{ABM} — відповідні коефіцієнти.

Що стосується знищення молекул озону, то тут також основними є реакції фотодисоціації



($h\nu_0 = 1.052 \text{ еВ}$) та зіткнення молекули озону з атомом кисню



Протягом деякого часу між озоном та молекулярним киснем встановлюється рівновага, яка визначається відношеннями

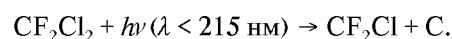
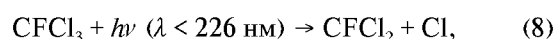
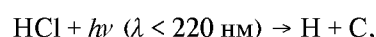
$$\frac{[O_3]}{[O_2]} \approx \left(\frac{k_{12}J_2[M]}{k_{13}J_3}\right)^{1/2} \quad (7)$$

вдень, та

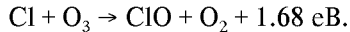
$$\frac{[O_3]}{[O_2]} \rightarrow \frac{k_{12}[M]}{k_{13}}$$

вночі. Тут J_2, J_3 — коефіцієнти швидкості фотодисоціації атомів кисню та озону, а k_{12} та k_{13} — коефіцієнти швидкостей реакцій дисоціації в процесі подвійного зіткнення молекул кисню та озону відповідно.

Крім цих основних реакцій, у фотохімії озону відповідну роль відіграють й інші газові складові, але оскільки їхня роль значно менша, увагу на них акцентувати не будемо. Виняток зробимо лише для фреонів, які тривалий час вважались основними знищувачами озону. Фреони безпосередньо з озоном не взаємодіють. Але атом хлору, який є основою цих сполук, у процесі реакції фотодисоціації відривається від молекули фреону. Такими основними реакціями є



Звільнений атом хлору взаємодіє з озоном:



Оскільки для відриву атомів фтору від молекул фреону необхідна значно більша енергія фотонів, то імовірність цього процесу можна вважати дуже малою, а тому відповідні реакції не приводимо.

Очевидно, що значення коефіцієнтів диссоціації J для реакцій (8) будуть значно менші, ніж для молекул кисню — реакція (2), а тому, з огляду на значно менші концентрації фреонів, навряд чи кількість вивільнених атомів хлору змогли суттєво вплинути на стан озоносфери.

Як було сказано вище, далеко не всі фахівці поділяли «фреонну гіпотезу», а тому розробляли альтернативні ідеї. Одна з них пов'язана зі зміною сонячної сталості, яка в ультрафіолетових променях ($\lambda < 300 \text{ нм}$) може сягати 30 %. В роботі [4] було показано, що такі зміни обумовлюють варіації об'ємної концентрації стратосферного озону у межах 3 %, що значно менше, ніж дані спостережень. Крім того, такі зміни мусять корелювати з 11-річним циклом сонячної активності і не залежати від висоти Сонця над горизонтом, що впливає з (5), а тому одночасно спостерігатись на всій земній кулі.

В кінці 1990-х років було висунуто гіпотезу, згідно з якою зменшенню концентрації стратосферного озону сприяє збільшення аерозольного забруднення у верхніх шарах земної атмосфери (вище 30 км). В цій моделі, згідно з виразом (5), на зміну $\tau_0^a(\nu)$ найперше відреагують приполярні райони. Крім того, оскільки аерозольний шар може бути не суцільним, а складатись із локальних утворень, то зменшення концентрації озону також може бути обмежене локальними районами, тобто з'являться окремі озонові дірки. Стержневим цієї гіпотези є загальновідомий факт про зміну оптичної товщини з довжиною хвилі, яка в першому наближенні описується виразом λ^{-n} . Нагадаємо, що для газової складової $n = 4$, для розсіювальної аерозольної складової $n < 4$ (дрібні частинки) і $n = 0$ (великі частинки), а в деяких випадках і $n < 0$. Для поглинального аерозолю, особливо коли уявна частина показника заломлення збільшується зі зменшенням довжини хвилі, значення цього параметра може бути більше за 4. Очевидно, що у випадку дрібного аерозолю зміна $\tau_0^a(\nu)$ сильніше проявиться на зміні коефіцієнта J для тих газів, для яких реакція фотодиссоціації відбувається при взаємодії з більш високочастотними фотонами. Хоча збільшення оптичної товщини зумовить зменшення коефіцієнта J для всіх газів, але, як видно з виразів (2) і (6), для молекули кисню воно буде відчут-

нішим, ніж для озону. Через це зменшення продуктивності утворення атомів кисню (а значить і молекул озону) буде більшим, ніж уповільнення продуктивності реакції фотодиссоціації молекул озону. Це означає, що в цій моделі спостережене зменшення концентрації стратосферного озону зумовлено не пришвидшенням процесу руйнації молекул озону, а зменшенням швидкості його утворення. До речі, рівновага озон — кисень (7) наступить при менших концентраціях озону. Відповідне моделювання [2] показало, що на згаданих висотах зменшенню концентрації озону на 10 % відповідає поява аерозольного шару з оптичною товщиною (на довжині хвилі 1 мкм) приблизно 0.002 для частинок з середньгеометричним радіусом 0.05 мкм, чи 0.02 для частинок 0.10 мкм. Відзначимо, що тут розглядався нормально-логіфічний закон розподілу частинок за розмірами (з дисперсією розмірів 0.1), а частинки вважалися повністю розсіюючими.

Важливо відзначити, що збільшення аерозольного забруднення верхніх шарів атмосфери ще більше зменшує руйнівну силу (відносно озону) хлорфторвуглеводнів. Це зумовлено тим, що основні реакції зі створення в атмосфері атомарного хлору відбуваються при взаємодії з фотонами $\lambda < 226 \text{ нм}$, тобто швидкості цих реакцій зменшаться більше, ніж для молекулярного кисню.

Джерелами стратосферного аерозолю можуть бути: мікрометеорити, уламки оболонок штучних супутників Землі, винесені конвективними атмосферними потоками продукти згоряння (заводські труби, пожежі, вулкани), конденсація різних газів та інше. Про потужність стратосферного аерозолю можна судити з рис. 1, побудованого за даними ШСЗ «Німбус-7» [5]. На ньому два піки зумовлені виверженнями вулканів Ель Чічон (1982 р.) і Маунт Хадсон та Пінатубо (1991 р.). До речі, дрібні частинки (з радіусами менше 0.1 мкм) можуть роками знаходитись на цих висотах.

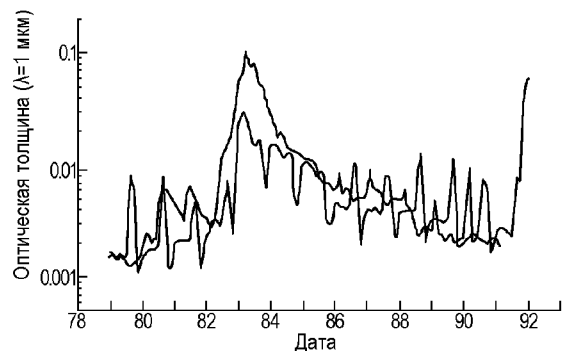


Рис. 1. Зміна в часі оптичної товщини аерозольного шару над Антарктидою на довжині хвилі 1 мкм

Для коректного моделювання процесу зміни концентрації стратосферного озону в рамках цього механізму і прогнозування появи цього ефекту над різними регіонами земного шару необхідно отримати дані про фізичні характеристики аерозольних частинок (величини комплексного показника заломлення, параметри функції розподілу частинок за розмірами, потужність (оптичну товщину) аерозольної складової атмосфери на висотах більше 30 км), а також структуру аерозольної складової в горизонтальній площині.

На жаль, інформація з цього питання досить обмежена і отримана методом спектрофотометрії блиску Сонця при його затемненню земною атмосферою. В той же час досвід досліджень аерозольно-газових шарів атмосфер планет Сонячної системи переконливо свідчить, що серед дистанційних методів досліджень з цього напрямку найефективнішим є поляриметричний [1]. Оскільки нас цікавить аерозоль на висотах більше ніж 30 км, то відповідні поляризаційні вимірювання потрібно вести на довжинах хвиль $\lambda < 300$ нм, де наявність потужного озонового поглинання повністю відсікає внесок тропосферного аерозолі. Наскільки нам відомо, поки що не реалізовано жодного проекту з дослідження поляризаційних властивостей відбитого Землею сонячного випромінювання у цій ділянці спектру з борту ШСЗ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Запропонований проект, який передбачає виготовлення бортового УФ-поляриметра (БУФП), ліквідує цю прогалину і дозволить не лише визначити характеристики і структуру стратосферного аерозолі, але й промодельовати стан озоносфери над різними регіонами земної кулі.

Ідея експерименту полягає в тому, що за допомогою УФ-поляриметра, встановленого на борту мікросупутника, систематично в кожний з його обертів навколо Землі проводити вимірювання відносної інтенсивності, ступеня поляризації і положення площини поляризації дифузно відбитого земною атмосферою сонячного випромінювання. Завдяки тому, що озоновий шар практично повністю поглинає сонячне випромінювання на $\lambda < 300$ нм, є можливість отримати інформацію про фізичні властивості атмосфери для висот більш ніж 30 км. Частина ультрафіолетового випромінювання, яка попадає в об'єкт бортового УФ-поляриметра, оптична вісь якого нахилена до надиру під кутом α , і є об'єктом дослідження (рис. 2). Поляриметричні дані, отримані протягом багатьох обертів мікро-

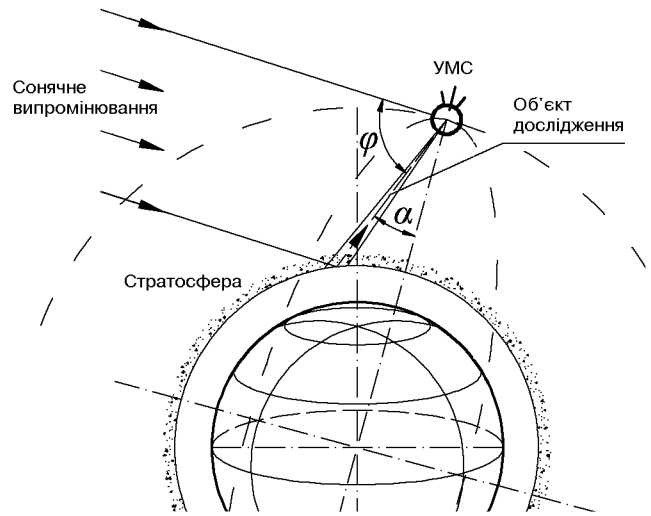


Рис. 2. Модель дослідження поляризації стратосферного аерозолі з борту УМС

супутника, дозволять побудувати їхню залежність від фазового кута φ для різних ділянок Земної кулі.

Аналіз цих даних дозволить з високою достовірністю визначити значення дійсної і уявної частини показника заломлення, а також розміру частинок, горизонтальну структуру аерозольного шару і дослідити імовірну її зміну в часі. Наявність цієї інформації дозволить провести точне моделювання процесів фотодисоціації молекул різних газів, в першу чергу молекул кисню і озону з урахуванням ослаблення інтенсивності випромінювання Сонця не лише газовою, але й аерозольною складовою верхніх шарів земної атмосфери. Все це дає можливість промодельовати швидкості утворення і руйнації молекули озону над різними ділянками земної кулі. В свою чергу, це дозволить однозначніше визначити механізм появи озонових дір, а значить й розробляти й приймати на Міжнародному рівні більш обґрунтовані заходи, що до запобігання цього катастрофічного явища.

Структурна схема експерименту зображена на рис. 3.

I. Об'єктом дослідження (ОД) є середовище в об'ємі, який утворюється при перетині умовного конусу огляду (зору) БУФП шаром стратосферного аерозолі.

II. Оптична система збору та формування потоку випромінювання (СЗФВ), яка збирає необхідну кількість випромінювання і створює плоскопаралельний пучок світла на розраховану потужність.

III. До складу оптико-механічного блоку (ОМБ) входять:



Рис. 3. Структурна схема побудови експерименту

- діафрагма, яка обмежує розміри пучка випромінювання;
 - поляроїдний модулятор, який перетворює поляризаційні параметри Стокса в інтенсивність світлового потоку;
 - блок світлофільтрів дозволяє зробити селекцію випромінювання по довжині хвилі;
 - блок формування зображення на приймач випромінювання;
 - блок тестування потоку світла;
 - блоки контролю температури.
- IV. Блоки реєстрації корисного сигналу (БР):
- блок фотоелектронного приймача;
 - підсилювач корисного сигналу;
 - система дискримінації вихідних імпульсів;
 - блок живлення, куди входить блок високої напруги.

V. Блок формування, обробки та передавання інформації (БОПІ), який забезпечує управління роботою БУФП, формування, зберігання і передачу отриманої інформації на Землю.

Таке спрощення та мініатюризація базується на тому, що прилад планується встановити на борт Українського молодіжного супутника (УМС), корисні габарити та потужність якого дуже обмежені.

ПРИНЦИПОВА СХЕМА ПОБУДОВИ ПРИЛАДУ

Нами було прораховано і розглянуто кілька методик визначення поляризації, і до кожної з них пророблялися різні варіанти функціональних та оптичних схем бортового ультрафіолетового поляриметра (БУФП). Найпридатнішою для БУФП на УМС є схема із статичним способом вимірювання поляризації (рис. 4).

Взагалі поляризаційний метод базується на перетворенні поляризаційних компонент світлового потоку в його інтенсивність. Такі перетворення можна проводити статичним і модуляційним способами. Поляризаційний статичний спосіб базується на одночасному вимірюванні інтенсивності випромінювання від двох розділених компонентів з перпендикулярною поляризацією, і накладає жорсткі вимоги до ідентичності обох каналів реєстрації світла, а також вимагає, щоб площина поляризації поляризаційного модулятора була зорієнтована паралельно до площини розсіяння. В даному випадку модулятор складається з поляризаційної призми, яка розділяє досліджуваний пучок світла відносно площини поляризації на звичайний та незвичайний. Далі світловий потік кожного каналу попадає на ФЕП, де він перетворюється на електричний сигнал за класичною схемою [3]. Далі сигнал подається на блок формування обробки і передачі інформації (БЖ), звідки інформація попадає на Землю.

Такий варіант побудови схеми БУФП на УМС (враховуючи енергетичні, вагові, габаритні вимоги до УМС) є найбільш придатним.

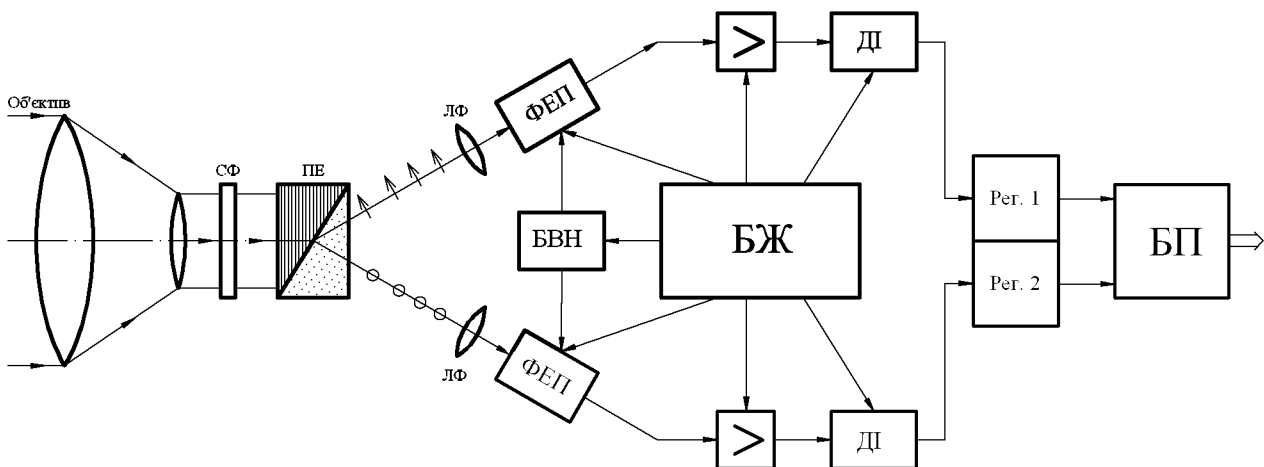


Рис. 4. Принципова схема побудови БУФП. СФ — світловий фільтр, ПЕ — поляризаційний елемент, ЛФ — лінза Фабрі, ФЕП — фотоелектронний помножувач, ДІ — дискримінатор імпульсів, БВН — блок високої напруги, БЖ — блок живлення, Рег. 1. Рег. 2. — реєстри, БПІ — блок формування обробки і передачі інформації

Інший можливий варіант — використання трьох поляризаторів (наприклад, призм Глана), які нерухомо розміщені так, що їхні площини поляризації зміщені на кути 60° і 120° . Хоча в цьому випадку ускладнюється вирішення проблеми метрології, але знімається вимога до строгої прив'язки площини поляризації до площини розсіяння.

ВИСНОВКИ

Реалізація проекту дає можливість визначити значення дійсної частини показника заломлення і розмірів стратосферного аерозолу, його оптичну товщину, а також дослідити горизонтальну структуру аерозольного шару і його зміни в часі. Це дасть можливість провести точне моделювання процесів фотодисоціації молекул різних газів, у першу чергу і озону, із врахуванням ослаблення випромінювання верхніми шарами земної атмосфери, а значить і промоделювати швидкості утворення і руйнування молекули озону над різними ділянками земної кулі. В свою чергу, це дозволить точніше визначити механізм появи озонових дір, а отже, розробляти і приймати на міжнародному рівні обґрунтовані заходи щодо запобігання цьому катастрофічному явищу.

1. Мороженко О. В. Методи і результати дистонційного зондування планетних атмосфер. — К.: Наук. думка, 2004.—647 с.
2. Мороженко О. В., Шаврина А. В., Велесь О. А. Роль стратосферного аерозолу у формуванні озонового шару // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.— С. 364—368.
3. Неводовский П. В., Видьмаченко А. П. Оптимизация параметров фотомножителей класса «Квантакон» // Тез. докл. 13-й Всерос. научно-техн. конф. «Обеспечение единства измерений в фотометрии и радиометрии оптического излучения». — М., 2001.—С. 17.
4. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. — М.: Мир, 1981.—352 с.
5. Hansen J. Climate Forcing and Feedbacks // Long-term monitoring of global climate Forcing and feedbacks. — New York, NASA Conf. publ.—1993.—3234.—P. 6—12.

THE UKRAINIAN YOUTH SATELLITE: INVESTIGATION OF THE EARTH'S AEROSOL STRATUM WITH THE USE OF UV-POLARIMETER

Ye. P. Nevodovskyi, A. P. Vid'machenko, O. V. Morozhenko, P. V. Nevodovskyi, I. I. Syniavskiy

We consider some reasons for changes in concentration of stratospheric ozone in upper stratum of the Earth's atmosphere (for heights more than 30 km). The Project of board UV-polarimeter for a wavelength of 250 nm for the Ukrainian Youth Satellite is proposed. Realization of the Project will give the possibility to derive with assurance the real and imaginary parts of the refractive index, sizes of small particles, horizontal structure of the aerosol stratum and to investigate its changes with time.

УДК 520.36

© Ю. С. Иванов, И. И. Синявский, М. Г. Сосонкин

Головна астрономічна обсерваторія НАН Україна, Київ

БОРТОВОЙ УФ-СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

Розглядається методика побудови спектрополяриметра підвищеної ефективності. Показано, що обмежена кількість елементів може виконувати функції оптичного редуктора, диспергуючого блоку і коректора аберацій. Такий підхід особливо вигідний в УФ-діапазоні, де велика кількість елементів традиційних спектрополяриметрів приводять до великих втрат. Пропонується система рознесених диспергуючих призм, що забезпечуює вирівнювання дисперсії і додатково підвищує ефективність приладу в короткохвильовій ділянці спектру.

ВВЕДЕНИЕ

Поляриметрические измерения вызывают растущий интерес астрофизиков, так как дают возможность определять: спектральные значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, распределение их по размерам, относительное содержание аэрозоля. Они позволяют изучать изменения оптических и тепловых свойств планетных

атмосфер с солнечной активностью. Зачастую такую информацию невозможно получить другим способом.

Весьма перспективными являются исследования поляризации в УФ-области спектра, но этот диапазон недоступен с поверхности Земли и требует специальных приборов для измерений с борта искусственных спутников и космических станций.

К сожалению, за последние 20—30 лет во всем