

УДК 621.38

М.Д. Гераїмчук, Ю.П. Куреньов, П.В. Неводовський, О.В. Мороженко, В.Б. Сергунін

**МЕТОД І ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ЗА ЗМІНАМИ СТАНУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ВІДБИТОГО ВІД ОЗОНОВОГО ШАРУ СТРАТОСФЕРИ ЗЕМЛІ**

The purpose of this paper is to choose the method and to create the device to control the condition of radiation polarization reflected from an ozone layer of the Earth stratosphere from a microsatellite board. We consider the research-related issues, as well as the algorithm and the organization of the space experiment. We conclude that it is possible to use the ultraviolet Stokes-polarimetry as the method for space Earth's ozone layer monitoring. It allows accessing the data on the solar radiation scattered by the stratosphere. The efficient automatic data accessing simplifies the signal processing and its transfer from the board of the artificial Earth satellite to various users (notably its transfer to the Earth). The research conducted demonstrates that the Stokes method provides the automatic access to the polarization parameters of the solar radiation scattered by the stratosphere much easier than classical ellipsometry methods do.

**Вступ**

Проблема визначення стану довкілля, передбачення екологічних катастроф, спостереження Землі з космосу тощо пов'язані зі змінами концентрації стратосферного озону (аерозолі) на висотах понад 30 км. Як вказують проведені дослідження [1, 2], фізичні характеристики стратосферного аерозолі найкоректніше можна визначити за даними поляризаційних спостережень, які проводяться з орбіти штучного супутника Землі (ШСЗ).

Методи й засоби аналізу стану поляризації в широкому спектральному діапазоні, які застосовуються для дослідження зірок на базі Фур'є-спектрометрів, виконаних за схемою інтерферометра Майкельсона, наведені в [3]; системи, які визначають вміст озону ( $O_3$ ), наприклад космічний апарат "Томсон", у вигляді спектрофотометра Добсона, що є основним засобом вимірювання вмісту  $O_3$  в атмосфері Землі, наведені в [4]. Однак згадані засоби дуже складні, великі за розмірами, дорогі в розробці й експлуатації. Також відомі системи відеополяриметрів для дослідження нестабільності випромінювання від протяжних об'єктів, де використовується метод Стокса [5, 6].

Задачею дослідження є застосування параметрів Стокса до аналізу сонячного випромінювання, відбитого земною стратосферою та прийнятого апаратом, встановленим на борту ШСЗ, в ультрафіолетовій (УФ) ділянці спектра ( $\Delta\lambda = 240\text{--}290$  нм).

Аналіз результатів вимірювання, отриманих протягом багатьох обертів супутника, дасть

зможу з високою імовірністю визначити значення дійсної і уявної частин показника заломлення  $n$ , а також розмір частинок  $r$  аерозолі верхніх шарів земної атмосфери і провести точне моделювання процесів фотодисоціації молекул кисню й озону. Використання цих даних дасть можливість визначити механізми появи озонних дір, а відповідно, і вживати обґрунтовані заходи на міжнародному рівні щодо запобігання цьому й іншим катастрофічним явищам [7].

**Постановка задачі**

На відміну від відомих схем, нами пропонується схема Стокс-поляриметра з одним обортовим аналізатором і фіксацією електричних значень корисного сигналу через кожні  $45^\circ$ . Така система дає можливість визначити три параметри Стокса  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  безпосередньо з вимірів, а параметр  $S_3$  обчислювати за формулою  $S_3 = [S_0^2 - (S_1^2 + S_2^2)]^{1/2}$ . Це дає змогу спростити схему приладу, позбувшись такого складного поляриметричного елемента, як фазова пластина.

Метою цієї роботи є вибір методу та створення пристрою контролю за станом поляризації сонячного випромінювання, відбитого від озонного шару стратосфери Землі, з борту мікросупутника.

**Теорія і метод**

Мікросупутник розміщений на полярній орбіті радіусом близько 600 км.

Пристрій є оптичним приладом, який працює в ультрафіолетовій ділянці спектра. Об'єктом дослідження є випромінювання Сонця, яке відбивається від озонового шару стратосфери Землі.

Спостереження за станом поляризації відносно атмосфери Землі ведеться в надір. Схема експерименту зображена на рис. 1.

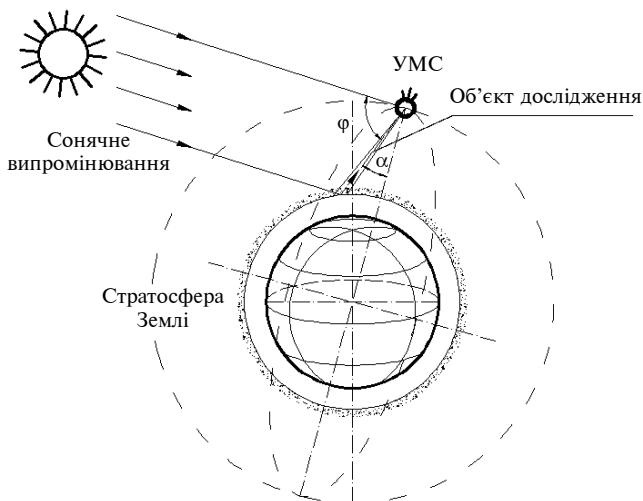


Рис. 1. Модель дослідження поляризації стратосферного аерозоля з борта мікросупутника УМС

Існує багато методів та оптичних схем, які використовуються у пристроях для вимірювання параметрів поляризованого випромінювання і які можна застосувати в космічних системах зондування атмосфери Землі з орбіти ШСЗ. Однак досвід досліджень аерозольно-газових шарів атмосфер планет Сонячної системи переконливо свідчить, що серед дистанційних досліджень у цьому напрямі найбільш ефективним є поляриметричний метод отримання параметрів вектора Стокса [1, 2]. Після відповідної обробки вони перетворюються на добре відомі в поляриметрії робочі параметри: еліптичність, нахил великої осі еліпса поляризації досліджуваного випромінювання й фазовий зсув між ортогональними складовими вектора поляризації. Теоретичні основи методу стокс-поляриметрії розглядаються в численних публікаціях [1, 8–13].

Для подальшого подання матеріалу як робочу гіпотезу зробимо такі припущення.

1. Розсіяне сонячне випромінювання, яке отримує прилад, є в загальному випадку еліптично поляризованим з невідомими параметрами еліпса поляризації.

2. За малий проміжок часу (частки секунди) стан поляризації розсіяного від масиву частинок випромінювання, відповідно до закону великих чисел, не може різко змінитися.

3. Оптична система має забезпечувати роботу приладу у вузькому спектральному діапазоні квазімонохроматичного і квазікогерентного випромінювання.

За такої постановки задачі найбільш придатним методом дистанційного дослідження атмосфери Землі є поляриметричний метод отримання параметрів Стокса.

Відповідно до геометричної схеми Сонце–Земля–супутник прилад, який встановлено на ШСЗ, здійснює зі своєї орбіти моніторинг розсіяного та відбитого від частинок аерозолів стратосферного шару сонячного випромінювання у вузькому спектральному діапазоні – в смузі Хартлі на довжині хвилі  $\lambda_0 = 254 \pm 10$  нм, що відповідає максимальному поглинанню озону  $O_3$ .

У загальному випадку випромінювання поляризованої електромагнітної хвилі можемо подати як еліпс поляризації з осями координат  $(x, y)$  (рис. 2), де  $\xi, \eta$  – власні вісі еліпса;  $\gamma$  – параметр еліптичності;  $\psi$  – допоміжний параметр еліптичності;  $b$  – мала вісь еліпса;  $a$  – велика вісь еліпса;  $\chi$  – азимут осі  $a$  відносно вісі  $x$  (азимут осі  $\xi$  відносно вісі  $x$ );  $\text{tg } \psi = A/B$  –

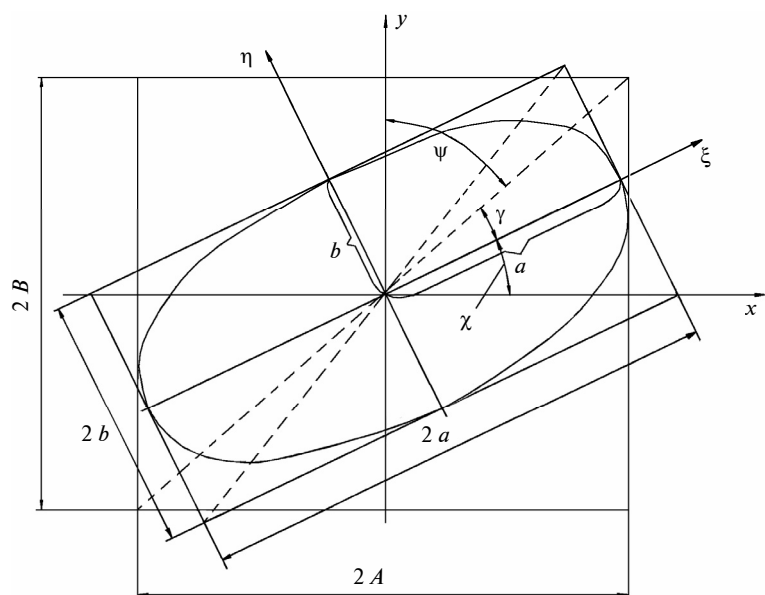


Рис. 2. Еліпс поляризації

еліптичність у системі координат  $(x, y)$ ;  $\text{tg } \gamma = b/a$  – еліптичність у системі координат  $(\xi, \eta)$ .

Параметри вектора Стокса дають можливість описати як повністю, так і частково поляризоване світло [12], а метод Джонса можна застосовувати тільки для повністю поляризованого світла, тому в цьому відношенні метод Стокса можна вважати більш загальним, ніж метод Джонса.

Якщо  $A$  і  $B$  – амплітуди  $x$ - і  $y$ -компонентів вектора еліптичності, а  $\delta = \delta_x - \delta_y$  – зсув фаз між ними, тоді параметри вектора Стокса  $S_0, S_1, S_2, S_3$  визначаються як

$$S_0 = \langle A^2 + B^2 \rangle,$$

$$S_1 = \langle A^2 - B^2 \rangle,$$

$$S_2 = \langle 2AB \cos \delta \rangle,$$

$$S_3 = \langle -2AB \sin \delta \rangle.$$

### Зв'язок між параметрами вектора Стокса і параметрами еліпса поляризації

Параметр вектора Стокса  $S_0$  – це інтенсивність, яка визначається експериментально вимірюванням величин  $v_1, v_2$ , а три інші параметри –  $S_1, S_2$  і  $S_3$  – зв'язані з параметрами еліпса:

$$S_0 = I_0 = a_s^2 + a_p^2 = v_1(0^\circ; 0^\circ) + v_2(90^\circ; 0^\circ),$$

$$S_1 = \cos 2\gamma \cos \chi, \quad (1)$$

$$S_2 = \cos 2\gamma \sin 2\chi, \quad (2)$$

$$S_3 = -\sin 2\gamma. \quad (3)$$

За співвідношеннями (1), (2) отримуємо

$$\text{tg } 2\chi = \frac{S_2}{S_1}, \quad (4)$$

тобто кут нахилу  $\chi$  великої вісі еліпса до вісі  $x$  можна визначити експериментально:

$$\text{tg } \gamma = -\cos 2\chi \frac{S_3}{S_1} = -\sin 2\chi \frac{S_3}{S_2}. \quad (5)$$

Еліптичність у системі координат  $(\xi, \eta)$  також визначається експериментально.

Кути  $\psi$  і  $\delta$  обчислюються за формулами

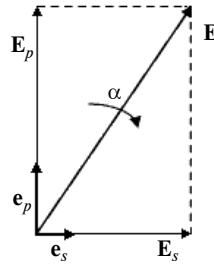
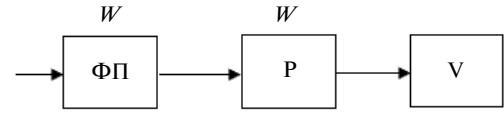


Рис. 3. Схема повного оптичного експерименту: ФП – фазова пластинка; Р – поляризатор; V – реєстратор сигналу; W – потік досліджуваного випромінювання;  $\alpha$  – азимут максимального пропускання поляризатора



$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } 2\gamma}{\sin 2\chi}, \quad (6)$$

$$\cos 2\psi = -\cos 2\gamma \cos 2\chi \quad (7)$$

відповідно до схеми повного оптичного експерименту [10] (рис. 3).

Квазімонохроматична хвиля описується за [12] таким виразом:

$$\mathbf{E}(t) = E_s(t)\mathbf{e}_s + E_p(t)\mathbf{e}_p,$$

де  $\mathbf{e}_s$  і  $\mathbf{e}_p$  – одиничні вектори, перпендикулярні до хвильового вектора  $\mathbf{k}$ .

Надалі для стислості запису опускаємо символ у круглих дужках  $(t)$ :

$$E_s = a_s \exp[i(\Phi_s - 2\pi\nu t)], \quad (8)$$

$$E_p = a_p \exp[i(\Phi_p - 2\pi\nu t)], \quad (9)$$

де  $a_s, a_p$  – амплітуди,  $\Phi_s$  і  $\Phi_p$  – фази ортогональних складових.

Функції  $a_s, a_p, \Phi_s, \Phi_p$  зареєструвати безпосередньо експериментально неможливо. Єдиним безпосередньо вимірюваним параметром випромінювання світла є його інтенсивність.

Покладаючи, що досліджуване випромінювання описується співвідношеннями (8), (9), фазова пластинка (ФП) надає  $S$ -поляризованій компоненті постійного фазового запізнення на певний фазовий кут  $\delta$ , а напрямком максимального пропускання  $p$  поляризатора утворює кут  $\alpha$  з напрямком  $\mathbf{e}_p$ , можна записати:

$$a_p^2 = v_1(0^\circ; 0^\circ), \quad (10)$$

де  $v_1(0^\circ, 0^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 0^\circ$  і  $\delta = 0^\circ$ ;

$$a_s^2 = v_2(90^\circ; 0^\circ), \quad (11)$$

де  $v_2(90^\circ, 0^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 90^\circ$  і  $\delta = 0^\circ$ ;

$$a_s a_p \cos \delta = v_3(45^\circ; 0^\circ) - v_4(135^\circ; 0^\circ), \quad (12)$$

де  $v_3(45^\circ, 0^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ ;  $v_4(135^\circ, 0^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 135^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ ;

$$2a_s a_p \sin \delta = v_6(135^\circ; 90^\circ) - v_5(45^\circ; 90^\circ),$$

де  $v_5(45^\circ, 90^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\delta = 90^\circ$ ;  $v_6(135^\circ, 90^\circ)$  – сигнал, виміряний при  $\alpha = 135^\circ$ ,  $\delta = 90^\circ$ .

Зв'язок отриманих виразів із параметрами вектора Стокса  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$  можна відобразити так:

$$S_0 = a_p^2 + a_s^2 = v_1(0^\circ; 0^\circ) + v_2(90^\circ; 0^\circ), \quad (13)$$

$$S_1 = a_p^2 - a_s^2 = v_1(0^\circ; 0^\circ) - v_2(90^\circ; 0^\circ), \quad (14)$$

$$S_2 = 2a_s a_p \cos \delta = v_3(45^\circ; 0^\circ) - v_4(135^\circ; 0^\circ), \quad (15)$$

$$S_3 = 2a_s a_p \sin \delta = v_6(135^\circ; 90^\circ) - v_5(45^\circ; 90^\circ). \quad (16)$$

Для повністю поляризованого випромінювання функції  $a_s(t)$ ,  $a_p(t)$ ,  $\Phi_s(t)$ ,  $\Phi_p(t)$  повністю корельовано, та при будь-яких  $a_s^2$ ,  $a_p^2$  і  $\delta$  має місце співвідношення

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2.$$

Тоді  $S_3$  можна подати у вигляді

$$S_3 = \sqrt{S_0^2 - (S_1^2 + S_2^2)},$$

що дає можливість обійтися в схемі на рис. 3 без ФП, тобто дає змогу не вимірювати  $v_5(45^\circ, 90^\circ)$  і  $v_6(135^\circ, 90^\circ)$ .

Для повністю деполаризованого світла будь-яка кореляція між функціями  $a_s(t)$ ,  $a_p(t)$ ,  $\Phi_s(t)$ ,  $\Phi_p(t)$  відсутня і дійсні такі співвідношення:

$$S_1 = S_2 = S_3 = 0,$$

$$S_0 = a_s^2 + a_p^2 = I_0,$$

де  $I_0$  – повна інтенсивність світла.

Об'єктом дослідження є середовище в об'ємі, який утворюється при перетині умовного ко-

нуса огляду (зору) поляриметра шаром стратосферного аерозолю. Оптична система збору та формування потоку випромінювання (СЗФВ) збирає необхідну кількість випромінювання і створює колімований пучок світла розрахованої потужності. До складу оптико-механічного блоку (ОМБ) входять: діафрагма; блок поляризації; блок світлофільтрів тощо. До складу блоків реєстрації корисного сигналу (БР) входять: блок фотоелектронного приймача; підсилювач корисного сигналу; система дискримінації вихідних імпульсів; блок живлення, до якого входить блок високої напруги. Далі йде блок формування, обробки та передачі інформації (БОПІ).

Розсіяне в стратосфері поляризоване (в загальному випадку еліптичне) випромінювання надходить на вхідну зіницю телескопа ( $\Gamma \sim (3-4)^x$ ) і далі виходить колімованим, стислим до діаметра 8–9 мм. Ця операція здійснюється для узгодження діаметрів апертур поляризатора і фотокатода ФЕП.

Поляризатор (призма Глана–Тейлора) обертається навколо оптичної вісі системи зі швидкістю  $1 \text{ с}^{-1}$ . Світлофільтр виділяє УФ діапазон випромінювання, яке надходить на фотокатод ФЕП, де перетворюються електричні імпульси, які після підсилення на підсилювачі та формування на дискримінаторі у вигляді TTL-імпульсів надходять на блок обробки та передачі інформації.

Оптична схема такого приладу наведена на рис. 4. Це конфокальна телескопічна система Мерсена–Галілея, побудована на двох сферичних дзеркалах 2 і 3. На відміну від системи Мерсена, відбиваючі поверхні обох дзеркал виконані не параболічними, а сферичними, оскільки жорстких вимог до сферичної аберації приймач світла не ставить. Збільшення телескопа  $\Gamma = 3^x$ .

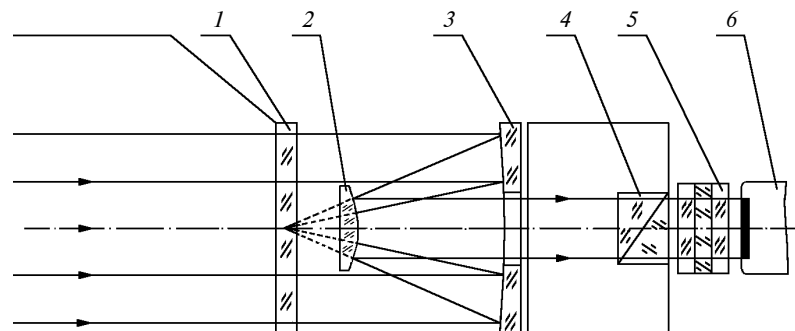


Рис. 4. Оптична схема стокс-поляриметра: 1 – захисне скло; 2 – мале дзеркало; 3 – вхідне дзеркало; 4 – призма Глана; 5 – інтерференційний світлофільтр; 6 – фотопомножувач

Випромінювання від безмежно віддаленого об'єкта досліджень (відстань від ШСЗ до верхніх шарів стратосфери  $\sim 600$  км) надходить через захисне скло 1, відбивається від поверхні вхідного дзеркала 2 і спрямовується на поверхню малого дзеркала 3, встановленого співфокусно з дзеркалом 2. Далі випромінювання в колімованому вигляді послідовно проходить через призму Глана–Тейлора 4, інтерференційний світлофільтр 5 і потрапляє на фотокатод ФЕП. ФЕП (фірми Hamamatsu, Японія) працює в УФ-діапазоні спектра випромінювання з  $\lambda_{\max} = 240$  нм. Призма конструктивно встановлена в п'єзодвигун UPM-11/24-1 з порожнім ротором і обертається з кутовою швидкістю  $\Omega_{\max} = 60$  об/хв.

#### Алгоритм отримання експериментальних даних і обчислення параметрів еліптичності

Алгоритм знімання відліків і обчислення параметрів еліптичності за один цикл вимірювання (один оберт поляризатора) буде таким:

1. На підставі формул (10)–(12) знімаються відліки:  $v_1 (0^\circ, 0^\circ)$ ,  $v_3 (45^\circ, 0^\circ)$ ,  $v_2 (90^\circ, 0^\circ)$ ,  $v_4 (135^\circ, 0^\circ)$ .

2. За формулами (13)–(16) обчислюються значення параметрів Стокса:  $S_0, S_1, S_2, S_3$ .

3. За формулами (1)–(7) обчислюються параметри еліптичності випромінювання:  $\text{tg } 2\chi$ ,  $\text{tg } \gamma$ ,  $\text{tg } \delta$ ,  $\cos 2\psi \rightarrow (\chi, \gamma, \delta, \psi)$ .

Після цього стан еліптичної поляризації можна вважати визначеним у повному обсязі.

Далі аналіз отриманих даних із застосуванням відповідних методик  $s$  порівнянь дає можливість визначити відповідні значення фізичних параметрів речовин, таких як характеристики аерозолів в озоновому прошарку, показник заломлення надтонкої діелектричної плівки тощо.

#### Конструкція макета стокс-поляриметра

Система телескопа (рис. 5) являє собою насипну конструкцію, що складається з корпусу, в який послідовно встановлюються велике вигнуте дзеркало, кільцева втулка, захисне скло 1 з малим опуклим дзеркалом і пружинне кільце 4,

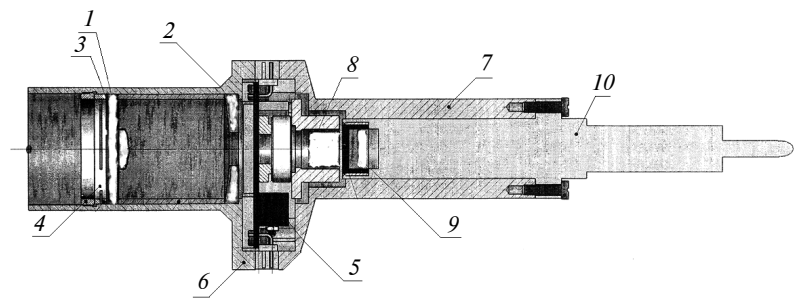


Рис. 5. Стокс-поляриметр: 1 – захисне скло; 2 – вхідне дзеркало телескопа; 3 – мале дзеркало телескопа; 4 – пружинне кільце; 5 – корпус п'єзодвигуна; 6 – корпус телескопа; 7 – корпус поляриметра; 8 – втулка елемента поляризації; 9 – інтерференційний світловий фільтр; 10 – блок ФЕП

що притискається різьбовим кільцем. Мале опукле дзеркало телескопа 3 посаджено на захисне скло 1 клейовим з'єднанням.

Корпус п'єзодвигуна 5 з'єднаний ліворуч із корпусом телескопа 6, а праворуч – з корпусом 7 ФЕП 10. Поляризаційна призма Глана за допомогою втулки 8 посаджена на підшипник двигуна. Інтерференційний світлофільтр 9 за допомогою втулки вставляється в корпус ФЕП. Корпуси телескопа, двигуна і ФЕП з'єднані між собою гвинтами. Макет встановлюється на посадкове місце за допомогою кронштейна і посадкових гвинтів.

Конструкція складається з 3-х частин: телескопа, двигуна з обертаючим поляризатором Глана–Тейлора і блока ФЕП, які пов'язані між собою різьбовими з'єднаннями та гвинтами. Довжина макета  $\sim 200$  мм, вага  $\sim 0,6$  кг, максимальний діаметр – 40 мм.

#### Висновки

Як показують проведені дослідження, перевагами запропонованої схеми стокс-поляриметра, побудованої на основі дзеркального телескопа зі сферичними відбиваючими поверхнями, є її технологічність, конструктивна простота і багатофункціональність, а також можливість переходу на будь-яку ділянку спектра в області  $\Delta\lambda = 0,25\text{--}14,0$  мкм без зміни якості колімації потоку випромінювання, що досягається заміною світлофільтра, поляризатора і фотоприймача.

Метод Стокса, реалізований у макеті, дасть можливість істотно спростити отримання поляризаційних параметрів розсіяного стратосферою випромінювання порівняно з класичними методами еліпсометрії. При цьому інформація про поляризаційні параметри досліджу-

ваного випромінювання може отримуватись оперативно за частки секунди автоматично.

Використання цього методу також дасть змогу спростити обробку отриманих сигналів і їх передачу з борту ШСЗ споживачу (на наземні станції, морські судна і літаки).

Цілодобовий, щомісячний моніторинг сонячного випромінювання, відбитого стратосфе-

рою Землі в УФ-ділянці спектра, проведений з борту ШСЗ, дасть змогу отримати данні про стан поляризації аерозольної складової стратосфери Землі.

У подальшому планується проведення досліджень зі створення малогабаритних стохастичних поляриметрів для їх використання при розв'язанні наукових і прикладних задач.

1. *Елементи і системи поляризаційних приладів для космічних досліджень* / М.Д. Гераїмчук, О.М. Генкін, О.В. Івахів та ін. – К.: ЕКМО, 2009. – 188 с.
2. *Мороженко О.В., Шаврина А.В., Велесь О.А.* Роль стратосферного аерозолю у формуванні озонової кулі // *Кінематика й фізика небесних тіл.* – 2000. – 16, № 4. – С. 364–368.
3. *Interferometr-polarimetr*, US Patent 3700334, 1972.
4. *R. McPeters et al.*, "Long-Term Changes in the Total Ozone Mapping Spectrometer Relative to World Primary Standard Dobson Spectrometer 83", *J. Geophys. Res.*, vol. 96, pp. 2987–2993, 1991.
5. *Шутов А.М.* Видеополариметры // *ОМП.* – 1993. – № 5. – С. 3–10.
6. *Шутов А.М.* Оптические схемы устройств измерения параметров поляризационного измерения // *ОМП.* – 1985. – № 11. – С. 52–56.
7. *Український* молодіжний супутник: дослідження аерозольного шару атмосфери Землі за допомогою УФ-полариметра / Є.П. Неволовский, А.П. Відьмаченко, О.В. Мороженко та ін. // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – 10. – № 5-6. – С. 27–32.
8. *Горшков М.М.* Эллипсометрия. – М.: Сов. радио, 1974. – 200 с.
9. *Волкова Е.А.* Поляризационные измерения. – М.: Изд. стандартов, 1974. – 156 с.
10. *Гусев К.К., Филатов А.Д., Сополев А.П.* Поляризационная модуляция. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
11. *Джерард А., Берч Дж.М.* Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 242 с.
12. *Основы* еллипсометрии / А.В. Ржанов, К.К. Свитащев, А.М. Семенов др. – Новосибирск: Наука, 1979. – 422 с.
13. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1984. – 584 с.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
23 червня 2012 року