

І. І. Синявський¹, Г. П. Міліневський^{1,2}, Ю. С. Іванов¹, М. Г. Сосонкін¹, В. О. Данилевський²,
В. К. Розенбуш¹, А. П. Бовчалоук¹, А. А. Лукенюк³, А. П. Шимків³, М. І. Міщенко⁴

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

³ Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Львів

⁴ Годдардівський інститут космічних досліджень НАСА, Нью-Йорк, США

МЕТОДИКА, АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ПІДГОТОВКИ ДО КОСМІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ «АЕРОЗОЛЬ-УА»

Проведено підготовку до створення комплексу наукової апаратури експерименту «Аерозоль-УА», зокрема поляриметра «СканПол», для вивчення з борту космічного апарата глобального розподілу фізичних властивостей аерозольних частинок та хмарних утворень в атмосфері Землі за вимірюваннями поляризаційних та спектральних характеристик розсіяного сонячного випромінювання. Виконано розробку вузлів макета поляриметра «СканПол», вузлів оптико-механічного блоку та блоку управління сканувальних дзеркал, а також електронних вузлів. Розроблено концепцію алгоритму визначення параметрів аерозолі над водною поверхнею, поверхнею Землі та хмарами. Продовжено доопрацювання методики роботи мобільної станції валідації та калібрування поляриметричних вимірювань аерозолі для підтримки космічного експерименту.

Ключові слова: космічний експеримент, дослідження аерозолів, поляриметр.

ВСТУП

Відомо, що аерозолі в атмосфері Землі суттєво впливають на клімат планети, однак інформації для кількісних оцінок цього впливу, зокрема від аерозолі антропогенної природи, недостатньо, особливо інформації про природу та фізичні властивості частинок. Космічний експеримент «Аерозоль-УА» має на меті створення бази даних, яка ґрунтується на безперервному вимірюванні з супутника оптичних характеристик аерозольних і хмарних частинок в атмосфері Землі протягом досить тривалого часу. База даних необхідна для визначення часового та просторового розподілу кількості, фізичних характеристик та хімічного

складу тропосферного і стратосферного аерозолі і хмарних частинок у земній атмосфері та оцінки їхнього впливу на погоду, клімат і ступінь забруднення навколишнього середовища [1].

Нижче описано результати виконання розділу проекту «Аерозоль-УА» з розробки сканувального поляриметра «СканПол», алгоритму опрацювання даних та методики наземної підтримки космічної місії. Ці роботи є продовженням підготовки космічної місії «Аерозоль-УА», розпочатої у 2013 р. за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

РОЗРОБКА ОПТИКО-МЕХАНІЧНОГО БЛОКУ ПОЛЯРИМЕТРА «СКАНПОЛ»

Оптична схема приладу. Сканувальний поляриметр «СканПол» місії «Аерозоль-УА» базується

© І. І. СИНЯВСЬКИЙ, Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ, Ю. С. ІВАНОВ,
М. Г. СОСОНКІН, В. О. ДАНИЛЕВСЬКИЙ, В. К. РОЗЕНБУШ,
А. П. БОВЧАЛОУК, А. А. ЛУКЕНЮК, А. П. ШИМКІВ,
М. І. МІЩЕНКО, 2015

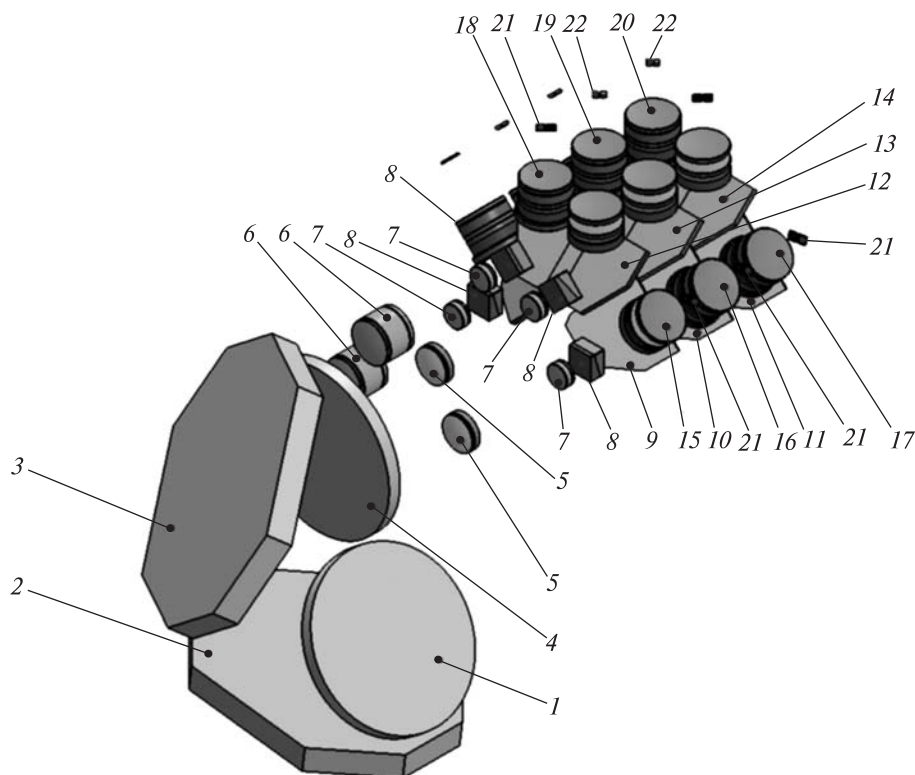


Рис. 1. Оптична схема поляриметра «СканПол»: 1—4 — сканувальна дзеркальна система, 5 — вхідний об’єктив оптичного блоку VIS, 6 — вхідний об’єктив оптичного блоку IR, 7 — коліматор, 8 — призма Волластона, 9—14 — дихроїчні дзеркала відповідних спектральних діапазонів, 15—20 — система камерних об’єктивів та інтерференційних фільтрів для відповідних спектральних каналів, 21 — приймач випромінювання для видимого спектрального діапазону, 22 — приймач випромінювання для ІЧ-діапазону

на концепції космічної місії НАСА «Глорі», метою якої був моніторинг просторового і часового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів у атмосфері Землі за допомогою поляриметра APS [15]. Експеримент «Глорі» не був виконаний у зв’язку з технічними проблемами ракети-носія під час запуску.

У поляриметрі «СканПол» кількість спектральних каналів зменшено до шести у порівнянні з поляриметром APS, але введено новий спектральний канал на $\lambda = 370$ нм. Орбітальний сканувальний поляриметр «СканПол» призначений для вимірювання з високою точністю параметрів Стокса I , Q , U у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової до короткохвильової інфрачервоної області в широкому діа-

пазоні фазових кутів з фотометричною точністю 4 % та поляриметричною точністю 0.2 %. Поляриметр «СканПол» складається з сканувальної дводзеркальної системи, призначеної для передачі сонячного випромінювання, розсіяного досліджуваними ділянками системи атмосфера — поверхня, на вхідні зіниці всіх оптичних блоків одночасно. Сканувальна система має пару дзеркал, що утворюють поляризаційно нейтральну комбінацію, яка робить близько 60 обертів за хвилину у площині орбіти космічного апарата. Кутівий діапазон сканування поверхні Землі складає $\pm 60^\circ$ від напрямку в наDIR. Поляриметр містить чотири оптичних блоки, два з яких забезпечують роботу УФ-каналу та каналів у видимому діапазоні спектру (VIS-1, VIS-2) з робочим спектральним діапазоном $\lambda = 370 \dots 555$ нм,

а два (IR-1, IR-2) — у близькій ІЧ-ділянці спектру з робочим спектральним діапазоном $\lambda = 865...1610$ нм (див. рис. 1). Спектральні канали поляриметра блоків VIS використовуються для оцінки поглинальної здатності тропосферного аерозолі та його вертикального розподілу (максимум пропускання $\lambda = 370$ нм, півширина діапазону пропускання $\Delta\lambda = 10$ нм), зондування аерозолі над океаном та суходолом ($\lambda = 410$ нм, $\Delta\lambda = 20$ нм), для визначення кольору океану та зондування аерозолі ($\lambda = 555$ нм, $\Delta\lambda = 20$ нм). Оптичні блоки IR містять спектральні канали, необхідні для зондування аерозолі над океаном та сушею ($\lambda = 865$ нм, $\Delta\lambda = 40$ нм), для відокремлення сигналу хмар цирусів і стратосферних аерозолів і відокремлення тропосферних та стратосферних аерозолів в разі потужних вивержень вулканів ($\lambda = 1378$ нм, $\Delta\lambda = 40$ нм), а також канал для оцінки внеску поверхні у вимірюваний сигнал над сушею ($\lambda = 1610$ нм, $\Delta\lambda = 40$ нм).

Оптичну схему приладу показано на рис. 1. Кожен з оптичних блоків складається з наступних елементів (попередньо, по ходу променя від сканувальної системи): вхідного об'єктива, що формує проміжне зображення досліджуваного об'єкта; польової діафрагми (на рис. 1 не показано); коліматора; призми Волластона, які розщеплюють випромінювання на компоненти S і P з ортогональною поляризацією і, таким чином, відіграють роль аналізатора; системи дихроїчних дзеркал та інтерференційних фільтрів, що виділяють необхідний вузький спектральний діапазон $\Delta\lambda$; камерних об'єктивів, які формують по два зображення (S і P) на приймачах випромінювання.

Конструкція оптико-механічного блоку. Проведено детальний аналіз та комп'ютерне моделювання оптико-механічного блоку приладу «СканПол». На рис. 2 показано його конструкцію, яка задовольняє відповідним вимогам компактності та жорсткості. Але головною вимогою є досягнення збігу полів зору кожного з чотирьох оптичних блоків. Для цього було запропоновано монолітний корпус з концентричними отворами, в які монтуються чотири вузли вхідних об'єктивів та коліматори. На рисунку основні елементи рознесені в просторі.

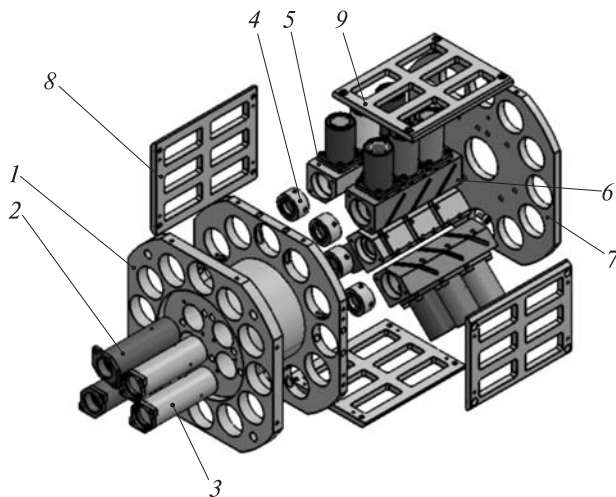


Рис. 2. Загальний вигляд оптико-механічного блоку: 1 — корпус, 2 — вузол вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS, 3 — вузол вхідного об'єктива та коліматора IR, 4 — вузол призми Волластона, 5 — вузол спектральної селекції та камерних об'єктивів VIS, 6 — вузол спектральної селекції та камерних об'єктивів IR, 7 — фланець, 8–9 — бокові пластини

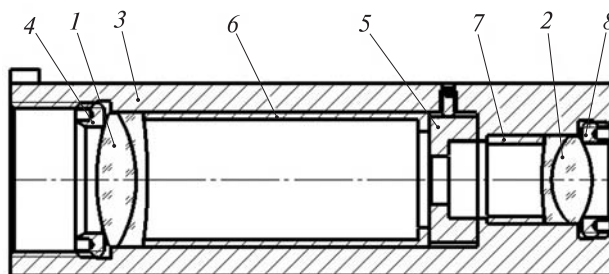


Рис. 3. Ескіз вузла вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS: 1 — вхідний об'єктив, 2 — коліматор, 3 — корпус, 4, 8 — елементи фіксації, 5 — діафрагма, 6, 7 — проміжні кільця

Основною функцією вузла вхідного об'єктива та коліматора (рис. 3) є виділення необхідного миттєвого поля зору, для чого використовується польова діафрагма, встановлена у фокальній площині вхідного об'єктива, та колімація випромінювання, що далі потрапляє на призму Волластона. Конструкція вказаного вузла розроблена таким чином, що дозволяє складати та юстувати кожен вузол окремо з чіткою фіксацією необхідного кутового поля зору системи.

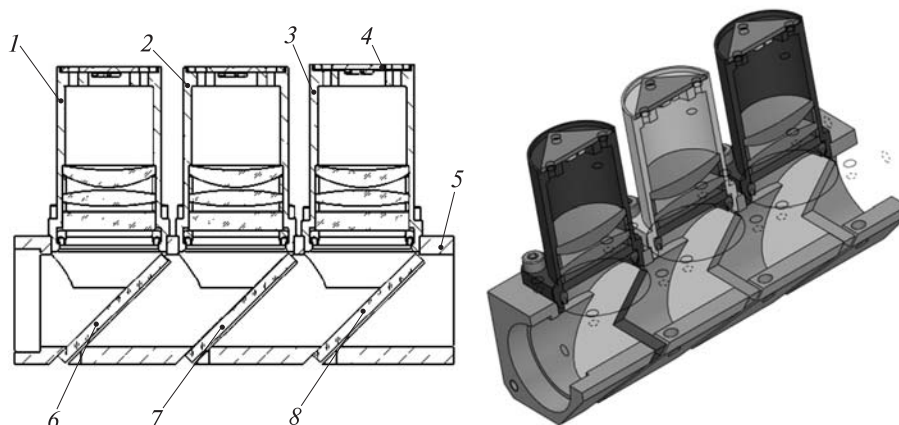


Рис. 4. Ескіз та модель у перерізі вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS: 1 — камерний об'єктив каналу 370 нм, 2 — камерний об'єктив каналу 410 нм, 3 — камерний об'єктив каналу 555 нм, 4 — модуль каналних перетворювачів світла зчитувача оптичної інформації, 5 — корпус, 6–8 — дихроїчні дзеркала

Вузли призм Волластона кожного оптичного блоку також розміщуються в корпусі (див. 4 на рис. 2) і можуть точно позиціонуватися по куту повороту навколо своєї осі при складанні та юстуванні оптико-механічного блоку.

Розроблено вихідні технічні вимоги до елементів спектральної селекції, а саме до дихроїчних дзеркал та інтерференційних світлофільтрів. Вузли спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичних блоків VIS та IR призначені для виділення необхідних вузьких спектральних каналів з напівширинами $\Delta\lambda$. На рис. 4 показано ескіз вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS. Вузол конструктивно представляє корпус, в якому закріплені дихроїчні дзеркала та до якого також кріпляться камерні об'єктиви. При складанні оптико-механічного блоку конструкція стягується боковими пластинами (рис. 2), що відіграють роль ребер жорсткості. Для макетного зразка оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол» підготовлено конструкторську документацію. Виготовлено основні вузли блоку, які будуть використані для натурних випробувань.

Попереднє дослідження блоку сканувальних дзеркал показало, що запропонована комбінація

дзеркал дійсно компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Залишкова величина поляризації залежить від довжини хвилі (у «синій» ділянці спектру збільшена на 0.6 %) та від кута поля зору (до 0.2 %). Ця величина може бути врахована калібруванням приладу.

Багатоканальний зчитувач оптичної інформації. Приймачі світла «СканПол» розташовані на модулях каналних перетворювачів світла зчитувача оптичної інформації (рис. 4). Макет багатоканального зчитувача оптичної інформації, який був розроблений та виготовлений, має забезпечувати перетворення потоку світла у визначених вище спектральних діапазонах в електричний сигнал з використанням фотодіодів та оцифрування даних вимірювань світлових потоків. Також було розроблено та виготовлено модулі каналних перетворювачів світла. Для перетворення аналогового сигналу з фотодіодів у цифрову форму було використано модуль E14-440 AD/DA Converter. Для перевірки функціонування багатоканального зчитувача оптичної інформації було розроблено та відпрацьовано відповідне програмне забезпечення. Розробка плат модулів пар фотоприймачів була виконана за умови забезпечення мінімальних розмірів та високої точності позиціонування фотодіодів.

КОНЦЕПЦІЯ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОЛЯРИМЕТРА «СКАНПОЛ»

Дані поляриметра «СканПол» складаються з результатів вимірювань потоку світла у спектральних каналах та з телеметричних даних. Визначення характеристик аерозольних та хмарних частинок шляхом розв'язку оберненої задачі за даними супутникового інструмента «СканПол» проекту «Аерозоль-UA» полягає в обробці результатів дистанційних кутових, мультиспектральних і поляризаційних вимірювань. Виміряна величина інтенсивності випромінювання повинна бути виправлена з врахуванням поглинання атмосферними газами з використанням супутникових даних OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite), OMI (Ozone Monitoring Instrument) та інших.

Алгоритм визначення характеристик аерозольних частинок застосовується для ділянок із хмарами та тонких перистих хмар по-різному. Алгоритм використовує статистичну оптимізацію для порівняння між промодельованим полем випромінювання і спостережними даними з урахуванням похибок обох полів. Процес пошуку найбільш точного збігу виконується шляхом ітерацій, доки похибки не стануть малими, що свідчить про визначення з високою точністю. Ефективне використання такого підходу вимагає надлишковості даних, яке буде забезпечене вимірюваннями поляриметра «СканПол» параметрів Стокса I , Q і U з більш ніж 200 кутів розсіяння для кожного пікселя на поверхні та у шести спектральних каналах (λ 370, 410, 555, 865, 1378, 1610 нм). Не всі вимірювання є незалежними, оскільки канал 1378 нм служить для оцінки внеску тонких перистих хмар та/або стратосферного аерозолі.

При здійсненні більш ніж 3600 ($3 \times 200 \times 6$) вимірювань для кожної ділянки спостереження «СканПол» вони можуть бути використані для визначення оптичної товщини, розміру, комплексного показника заломлення і альbedo одноразового розсіяння (SSA) для бімодального розподілу за розмірами аерозолів над океаном і сушею, а також над хмарами. Алгоритм обробки даних супутникового поляриметра «СканПол» є подібним до алгоритму прототипу інструмента APS, що був використаний для вимірювань з літака [18].

Моделювання вимірювань. Інтенсивність та поляризація сонячного випромінювання описується вектором Стокса, який складається з чотирьох параметрів I , Q , U та V [9]:

$$\mathbf{I} = (I, Q, U, V)^T, \quad (1)$$

де I описує інтенсивність поля випромінювання, Q та U — величину та напрям лінійної поляризації, а V — величину кругової поляризації.

Вектор інтенсивності сонячного променя, що проходить через плоскопаралельну атмосферу у напрямку (θ_s, φ_s) , позначимо \mathbf{I}_0 , де θ_s та φ_s — сонячний зенітний та азимутальний кути відповідно. Враховуючи відбивні властивості поверхні Землі, вихідний вектор Стокса \mathbf{I}_u на верхній границі атмосфери у напрямку (θ_v, φ_v) запишемо таким чином:

$$\begin{aligned} & \pi \mathbf{I}_u(\lambda, \mu_s, \mu_v, \varphi_s - \varphi_v) = \\ & = \mu_s \mathbf{R}^{Atm+Surf}(\lambda, \mu_s, \mu_v, \varphi_s - \varphi_v) \mathbf{I}_0(\lambda, \mu_s, \varphi_s), \end{aligned} \quad (2)$$

де λ вказує на спектральну залежність величини, μ_s та μ_v — косинуси сонячного та спостережного зенітного кутів відповідно. $\mathbf{R}^{Atm+Surf}$ — це матриця відбиття (4×4) системи поверхня — атмосфера [9], яка описує усі процеси розсіяння, що виникають у цій системі. Ці матриці можуть бути обчислені для будь-якої заданої моделі атмосфери та поверхні з використанням методу додавання [6]. Подібні матриці можуть бути обчислені для висхідного та низхідного випромінювання на будь-якому рівні атмосфери, що дозволяє моделювати поляризоване поле випромінювання для порівняння з виміряним полем поляриметра «СканПол».

Для того щоб обчислити властивості багаторазового розсіяння в атмосфері, використовуючи метод додавання, потрібно задати вертикальний розподіл розсіювальних частинок та їхні властивості. Ми використовуємо молекулярну оптичну товщину, наведену у роботі [9] з шкалою висот 8 км, разом зі спектрально інваріантною деполіризацією 0.028 [2] для визначення властивостей та вертикального розподілу релеївського розсіювання. Припускаємо, що розподіл аерозолі за розмірами бімодальний, кожна з мод (дрібнодисперсна та крупнодисперсна) описується власним логнормальним розподілом за розмірами:

$$N(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma r}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

де r_g — середній геометричний радіус (мкм), σ^2 — дисперсія, а N_0 (мкм⁻²) — загальна кількість частинок на одиницю площі вздовж напрямку спостереження. Частинки аерозолу в алгоритмі над сушею вважаються сферичними, тому для визначення їхніх оптичних властивостей потрібно визначити комплексний показник заломлення $m_r - im_i$ для кожної моди. Оптичну товщину аерозолу τ та альбедо одноразового розсіювання ω_0 можна визначити через поперечні перерізи екстинкції (C_{ext} , мкм²) та розсіювання (C_{scat} , мкм²):

$$\tau = N_0 C_{ext}, \quad (4)$$

$$\omega_0 = C_{scat} / C_{ext}. \quad (5)$$

Для природного світла колова поляризація, як правило, на кілька порядків менша за лінійну поляризацію, тому нею нехтують та використовують наближення 3×3 для повної матриці відбиття 4×4 . Загальний коефіцієнт відбиття виражається через позаатмосферну спектральну густину енергетичної світності I_0 (Вт/м²нм⁻¹):

$$R = \pi I / (\mu_s I_0). \quad (6)$$

Коефіцієнт відбиття поляризованого сонячного випромінювання дорівнює

$$R_p = \pi Q / (\mu_s I_0), \quad (7)$$

де Q — другий параметр Стокса, визначений відносно площини розсіювання. Параметр Q тут достатній для опису лінійної поляризації, оскільки величина U стає незначною, коли параметри Стокса визначаються відносно площини розсіювання і коли коефіцієнт відбиття поляризованого випромінювання від поверхні є аналогічним до коефіцієнта відбиття Френеля [4]. Знак коефіцієнта відбиття поляризованого випромінювання буде додатним (від'ємним), коли напрям поляризації перпендикулярний (паралельний) до нормалі до площини розсіювання. Коефіцієнт відбиття поляризованого випромінювання визначається законом Френеля (тобто, показником заломлення поверхні та кутом відбиття), фізичними властивостями поверхні (шорсткістю, нахилом листя тощо), напрямками та місцем спостереження.

Алгоритм. Відтворення характеристик частинок полягає у визначенні найбільш вірогідного стану атмосфери у залежності від вимірних величин та деякого апріорного значення цього середовища [17]. Визначення найбільш вірогідного стану атмосфери ідентичне до мінімізації функції втрат Φ :

$$\Phi = (\mathbf{Y} - \mathbf{F})^T \mathbf{C}_T^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}) + (\mathbf{X} - \mathbf{X}_a)^T \mathbf{C}_a^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_a), \quad (8)$$

де \mathbf{Y} — вимірний вектор, \mathbf{F} — модельний вектор, \mathbf{C}_T^{-1} — загальна коваріаційна матриця похибок, \mathbf{X} — вектор стану атмосфери, \mathbf{X}_a — вектор апріорного стану атмосфери, \mathbf{C}_a^{-1} — апріорна коваріаційна матриця похибок.

Перший доданок у рівнянні (8) відповідає зваженим похибкам методу найменших квадратів і показує відстань між вимірним та змодельованим коефіцієнтом відбиття поляризованого випромінювання. Загальна коваріаційна матриця похибок обраховується для похибок вимірювання та деяких потенційних похибок моделювання.

Другий доданок у рівнянні (8) є «штрафною» функцією, що обмежує розв'язок бути близьким до апріорного стану та визначається кількісно апріорною коваріаційною матрицею похибок. Вектор стану \mathbf{X} містить параметри аерозолу, що дозволяють характеризувати кожну моду окремо (f — дрібнодисперсна, c — крупнодисперсна): N^f , r_g^f , σ^f , m_r^f , m_i^f , N^c , r_g^c , σ^c , m_r^c , m_i^c та тиск P , що відповідає висоті, де лежить верхня границя аерозольного шару. Апріорне значення параметрів аерозолу ґрунтується на даних, приведених у роботі [7]. Апріорні значення N^f та N^c отримуються з використанням підходу Look-Up-Table (LUT).

Визначення найкращого розв'язку \mathbf{X} , що мінімізує функцію втрат, потребує розв'язання нелінійного рівняння. Нелінійні системи зазвичай розв'язуються за допомогою процедури ітерацій Гаусса — Ньютона, проте на практиці застосовується метод Левенберга — Марквардта [17], який реалізується за допомогою рівняння

$$\mathbf{X}^{i+1} = \mathbf{X}^i - [\mathbf{H}(\mathbf{X}^i) + \gamma \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \nabla_{\mathbf{X}} \Phi(\mathbf{X}^i), \quad (9)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}^i) = \nabla_{\mathbf{X}}^2 \Phi(\mathbf{X}^i) \approx \mathbf{C}_a^{-1} + \mathbf{K}_i^T \cdot \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{K}_i, \quad \mathbf{K}_i = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}_i}. \quad (10)$$

де \mathbf{I} — одинична матриця з розмірністю вектора стану, i вказує на число ітерацій, а γ — додатний коефіцієнт, що спричинює збіжність ітерацій, \mathbf{H} — матриця Гессе, \mathbf{K} — матриця Якобі, яка виражає чутливість прямої моделі до відтвореної величини (тобто, чутливість коефіцієнта відбиття поляризованого випромінювання до параметрів аерозолі).

Критерії зміни величини γ залежать від поведінки збіжності. Якщо $\Phi(\mathbf{X}^{i+1}) > \Phi(\mathbf{X}^i)$, то відкидається розв'язок і збільшується значення γ , поки $\Phi(\mathbf{X}^{i+1}) < \Phi(\mathbf{X}^i)$, тоді приймається розв'язок \mathbf{X}^{i+1} , і зменшується γ . Для більших значень γ стрімкий спуск переважає, і збіжність повільна (тобто, малий розмір кроку), але надійна, тоді як при менших значеннях пошук перетворюється на швидкий ньютонівський спуск. Процес ітерацій зупиняється тоді, коли не відбувається зміни функції втрат між двома виконаними ітераційними кроками.

Метод оптимальної оцінки також забезпечує похибки відтворених параметрів. Матриця Гессе, отримана на останньому кроці ітерацій, може бути використана для обчислення коваріаційної матриці похибок \mathbf{C}_x при відтворенні параметрів:

$$\mathbf{C}_x = (\mathbf{C}_a^{-1} + \mathbf{K}_i^T \cdot \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{K}_i)^{-1}. \quad (11)$$

Квадратні корені діагональних елементів дозволяють отримати стандартне відхилення, пов'язане з кожним відтвореним параметром. Мікрофізичні параметри аерозолі, що містяться у векторі \mathbf{X} коваріаційної матриці похибок \mathbf{C}_x , при відтворенні параметрів можуть бути використані для обчислення стандартного відхилення, пов'язаного з будь-яким іншим параметром аерозолі, що залежить від елементів \mathbf{X} . Для оптичної товщини аерозолі стандартне відхилення дорівнює

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{x,i,j} \frac{\partial \tau}{\partial X_i} \frac{\partial \tau}{\partial X_j}}. \quad (12)$$

Подібна формула застосовується і для альbedo одноразового розсіяння.

Перше припущення для параметрів аерозолі (\mathbf{X}^0) необхідне для початку ітераційного процесу, а «хороше» припущення дозволяє скоротити кількість ітерацій та полегшує завдання

знаходження розв'язку \mathbf{X} , що є локальним мінімумом функції втрат Φ . Ми використовуємо підхід LUT, щоб отримати першу оцінку оптичної товщини та модель аерозолі. Коефіцієнти відбиття поляризованого випромінювання розраховуються для різних оптичних товщин аерозолі, напрямків спостереження та аерозольних моделей.

НАЗЕМНА ПІДТРИМКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наземна підтримка вимірювань аерозолі у проєкті «Аерозоль-UA» базується на методиці, обладнанні та досвіді міжнародної мережі AERONET [10]. Контроль достовірності даних поляриметра «СканПол» буде виконуватись шляхом порівняння інтегральної по висоті спектральної оптичної товщини аерозольного шару, а також усереднених по висоті усього атмосферного стовпа параметрів аерозольних частинок, визначених з одночасних вимірювань оптичних характеристик однієї й тієї ж повітряної маси, виконаних приладом «СканПол» та засобами AERONET. Зокрема, два фотометри CIMEL CE318 цієї мережі вже встановлено в Україні, і опрацювання наземних даних спостережень аерозолі на українських станціях AERONET, виконане нещодавно, дозволило визначити сезонні характеристики аерозолі в атмосфері над Україною [13]. Один з цих фотометрів планується використовувати як мобільну станцію AERONET, яка буде розташовуватися у місцевостях, через які пролягатиме наперед обчислена траса підсупутникової точки «Аерозоль-UA». Критерії «одночасності» наземних та супутникових вимірювань вже визначені у численних роботах [5, 8, 11, 12, 16]. Використання мобільної станції AERONET дозволить оперативно виконувати такі одночасні спостереження саме у підсупутниковій області траєкторії апарата «Аерозоль-UA», що надасть можливість покращити точність даних, отриманих з супутника. Набутий раніше [3, 14] досвід роботи з мобільною станцією в різних районах України дозволяє відпрацювати експериментально методику наземної підтримки та перевірки достовірності досліджень аерозолі в атмосфері Землі інструментами космічного проєкту «Аерозоль-UA» [1].

ВИСНОВКИ

Проведено комп'ютерне моделювання елементів та частин оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол», а саме вузлів VIS та IR, вхідних об'єктивів та коліimatorів, вузла призм Волластона, VIS- та IR-вузлів спектральної селекції і камерних об'єктивів, оптико-механічного блоку в цілому. Розроблено вихідні технічні вимоги до елементів спектральної селекції, а саме до дихроїчних дзеркал та інтерференційних світлофільтрів. Виготовлено конструкторську документацію макетного зразка оптико-механічного блоку бортового поляриметра «СканПол» для натурних випробувань та виготовлені основні вузли блоку. Виконано роботи зі створення макета багатоканального зчитувача оптичної інформації, зокрема розроблено та виготовлено модулі каналних світлоперетворювачів. Проведено дослідження блоку сканувальних дзеркал, результати якого показали, що використана комбінація дзеркал компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Розроблено основні етапи концепції алгоритму з відновлення параметрів аерозолю. Продовжено роботу над створенням методики і спостережних засобів для наземного контролю достовірності результатів космічного експерименту.

Роботу виконано за фінансової підтримки проекту 336Кт «Аерозоль-UA» (NAS) в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр.

1. Яцкив Я. С., Мищенко М. И., Розенбуш В. К. и др. Проект «Аерозоль»: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 3—15.
2. Bodhaine B., Wood N. B., Dutton E. G., Slusser J. R. On Rayleigh optical depth calculations // J. Atmos. Oceanic Technol. — 1999. — **16**. — P. 1854—1861.
3. Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Milinevsky G., et al. Aerosol Microtops II sunphotometer observations over Ukraine // Adv. Astron. Space Phys. — 2013. — **3**. — P. 46—52.
4. Bréon F. M., Tanré D., Lecomte P., Herman M. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 1995. — **33**. — P. 487—499.
5. Chu D. A., Kaufman Y. J., Ichoku C., et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval overland // Geophys. Res. Lett. — 2002. — **29**. — P. 1617 (4 p.).
6. De Haan J. F., Bosma P. B., Hovenier J. W. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light // Astron. and Astrophys. — 1987. — **183**. — P. 371—391.
7. Dubovik O., Holben B. N., Eck F. T., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. — 2002. — **59**. — P. 590—608.
8. Fan X., Goloub P., Deuze J.-L., et al. Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia // Remote Sens. Environ. — 2008. — **112**. — P. 697—707.
9. Hansen J. E., Travis L. D. Light scattering in planetary atmospheres // Space Sci. Rev. — 1974. — **16**. — P. 527—610.
10. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. — 1998. — **66**. — P. 1—16.
11. Ichoku S., Chu D.A., Mattoo S., et al. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products // Geophys. Res. Lett. — 2002. — **29**. — P. 1616 (4 p.).
12. Kahn R. A., Gaitely B. J., Martonchik J. V., et al. Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations // J. Geophys. Res. — 2005. — **110**. — P. D10S04 (16 p.).
13. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban-industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements // Atmos. Meas. Tech. — 2014. — **7**. — P. 1459—1474.
14. Milinevsky G. P., Danylevsky V. O., Grytsai A. V., et al. Recent development of atmosphere research in Ukraine // Adv. Astron. Space Phys. — 2012. — **2**. — P. 114—120.
15. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., et al. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory mission // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2007. — **88**. — P. 677—691.
16. Mishchenko M. I., Liu L., Geogdzhayev I. V., et al. Toward unified satellite climatology of aerosol properties. 3. MODIS versus MISR versus AERONET // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. — 2010. — **111**. — P. 540—552.
17. Rodgers C. D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. — Hackensack, NJ: World Scientific Publ., 2000. — 238 p.
18. Waquet F., Cairns B., Knobelspiesse K., et al. Polarimetric remote sensing of aerosols over land // J. Geophys. Res. — 2009. — **114**. — 23 p. — D01206.

Стаття надійшла до редакції 17.12.14

И. И. Синявский¹, Г. П. Милиневский^{1,2}, Ю. С. Иванов¹,
М. Г. Сосонкин¹, В. А. Данилевский², В. К. Розенбуш¹,
А. П. Бовчалюк¹, А. А. Лукенюк³, А. П. Шымкив³,
М. И. Мищенко⁴

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

³ Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Львов

⁴ Годдардовский институт космических исследований НАСА, Нью-Йорк, США

МЕТОДИКА, АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОДГОТОВКИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «АЭРОЗОЛЬ-UA»

Проведена подготовка к созданию комплекса научной аппаратуры эксперимента «Аэрозоль-UA», в частности поляриметра «СканПол», для изучения с борта космического аппарата глобального распределения физических свойств аэрозольных частиц и облачных образований в атмосфере Земли по измерениям поляризационных и спектральных характеристик рассеянного солнечного излучения. Выполнена разработка узлов макета поляриметра «СканПол», узлов оптико-механического блока и блока сканирующих зеркал, а также электронных узлов. Выполнены работы по созданию макета многоканального считывателя оптической информации, в частности разработаны и изготовлены модули канальных преобразователей света. Проведено предварительное исследование блока сканирующих зеркал, результаты которого показали, что предложенная комбинация зеркал компенсирует поляризацию при отражении от металлического покрытия. Разработана концепция алгоритма определения параметров аэрозоля над водной поверхностью, поверхностью Земли и облаками. Продолжена доработка методики работы мобильной станции валідації и

калибровки поляриметрических измерений аэрозоля для поддержки космического эксперимента.

Ключевые слова: космический эксперимент, исследование аэрозолей, поляриметр.

I. I. Syniavskiy¹, G. P. Milinevsky^{1,2}, Yu. S. Ivanov¹,
M. G. Sosonkin¹, V. O. Danylevsky², V. K. Rosenbush¹,
A. P. Bovchaliuk¹, A. A. Lukenyuk³, A. P. Shymkiv³,
M. I. Mishchenko⁴

¹ Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Taras Shevchenko National University of Kyiv

³ Lviv Centre of Institute for Space Research of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Lviv

⁴ The NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, USA

METHODOLOGY, HARDWARE IMPLEMENTATION, AND VALIDATION OF SATELLITE REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC AEROSOLS: FIRST RESULTS OF THE AEROSOL-UA SPACE EXPERIMENT DEVELOPMENT

Preparations have been made for the development of the instrumentation suite for the space experiment Aerosol-UA (NAS), in particular, of the polarimeter ScanPol intended for remote-sensing studies of the global distribution of aerosol properties and clouds in the terrestrial atmosphere by means of polarimetric and spectral measurements of the scattered sunlight. Various components of the polarimeter ScanPol have been prototyped, including the optomechanical and electronics assemblies and the scanning mirror controller. The conceptual design of the algorithm for the retrieval of aerosol parameters over water and land surfaces and clouds has been developed. Methods for the validation of satellite data using a mobile sunphotometer station as well as for the calibration of aerosol polarimetry have been further refined.

Key words: space experiment, the study of aerosols, polarimeter.