

І. І. Синявський<sup>1</sup>, Ю. С. Іванов<sup>1</sup>, Г. Сосонкін<sup>1</sup>, Г. П. Міліневський<sup>1,2,3</sup>, Г. В. Кошман<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Міжнародний центр науки майбутнього, Цзилінський університет, Чанчунь, Китай

<sup>3</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ІМІДЖЕР-ПОЛЯРИМЕТР КОСМІЧНОГО ПРОЕКТУ «АЕРОЗОЛЬ-UA»

*Аерозолі в земній атмосфері є найменш вивченим компонентом, через що є певна невизначеність в оцінці їхнього впливу на радіаційний баланс планети. Більше того, інформації про глобальний розподіл антропогенних аерозолів практично немає, що вкрай ускладнює тестування і поліпшення моделей переносу аерозолів в атмосфері і прогрес в розумінні антропогенного впливу на клімат та довкілля. Після невдалого запуску місії Glory у 2011 році з'явився розрив у наявності сучасних аерозольних орбітальних інструментів, тому, що запуски аналогічних типів приладів заплановані на 2019 рік і пізніше. Це одна з причин того, що ми розглядаємо науковий космічний проект з аерозольним сканувальним поляриметром «СканПол», та мультиспектральним іміджером-поляриметром (МСІП) на борту космічного апарата як своєчасну місію, яка дозволить отримати необхідні мікрофізичні і хімічні параметри, визначивши показник заломлення природних і антропогенних аерозолів. Основним призначенням одного з приладів проекту «Аерозоль-UA» інструмента МСІП є проведення поляриметричних та фотометричних вимірювань розсіяного сонячного випромінювання з метою подальшого отримання інформації про характеристики аерозолів, а також визначення впливу хмарності на вимірювання з поляриметром «СканПол». Запропонована власна концепція оптичної схеми іміджера-поляриметра, яка базується на принципі поділу вхідного зображення на чотири квазіідентичні вторинні зображення. Такий підхід дозволяє уніфікувати оптичну схему каналів поляриметра, яка дозволяє трансформувати поляризаційний канал у фотометричний канал з чотирма субканалами із різними спектральними діапазонами. Така трансформація виконується заміною секторного поляризатора на секторний фільтр з чотирма різними довжинами хвиль у кожному секторі. Поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних каналів з полем зору  $60 \times 60^\circ$ . Три канали є поляризаційними, кожний з яких дозволяє проводити поляриметричні вимірювання трьох параметрів Стокса I, Q, U в центральних довжинах хвиль  $\lambda = 410, 555, 865$  нм зі спектральними півширинами  $FWHM = 20$  нм. Два канали МСІП призначено для фотометричних вимірювань у восьми спектральних діапазонах з центральними довжинами хвиль  $\lambda = 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865, 910$  нм зі спектральними півширинами  $FWHM = 20 \dots 40$  нм. Проведено розрахунок та оптимізацію кожної із оптичних схем та моделювання механічної конструкції поляриметра. Виготовлено, складено та від'юстовано експериментальний зразок одного з оптичних каналів поляриметра МСІП. Попередні результати дослідження продемонстрували збіжність теоретичних та експериментальних розрахунків оптичної схеми каналів МСІП. Слід зауважити, що дослідження проводилися без поляризаційного елемента. Подальші етапи будуть пов'язані з лабораторним дослідженням та калібруванням поляризаційних характеристик МСІП, зокрема з оцінюванням інструментальної поляризації та визначенням можливостей її врахування.*

**Ключові слова:** аерозолі, зображувальний поляриметр, космічний експеримент.

### ВСТУП

Аерозолі в земній атмосфері є найменш вивченим компонентом, в результаті чого є невизначеність в оцінці їхнього впливу на радіаційний баланс планети. Більше того, інформації про глобальний розподіл антропогенних аерозолів практично немає, що вкрай ускладнює тестування і поліпшення моделей переносу аерозолів в

атмосфері і прогрес в розумінні антропогенного впливу на клімат та довкілля.

Після невдалого запуску місії «Глорія» [13] у 2011 р. утворилась прогалина в ряду сучасних аерозольних орбітальних інструментів, тому що запуски аналогічних типів приладів заплановані на 2019 р. і пізніше. Це одна з причин того, що ми розглядаємо науковий космічний проект з аерозольним сканувальним поляриметром «СканПол» [2] та мультиспектральним іміджером-поляри-

метром МСІП на борту космічного апарата як своєчасну місію, яка дозволить отримати необхідні мікрофізичні і хімічні параметри шляхом визначення показника заломлення природних і антропогенних аерозолів [2, 12].

Основним призначенням одного з приладів проекту «Аерозоль-UA» інструмента МСІП є проведення поляриметричних та фотометричних вимірювань розсіяного сонячного випромінювання з метою подальшого отримання інформації про характеристики аерозолів, а також визначення впливу хмарності на вимірювання з поляриметром «СканПол». Основні характеристики МСІП та стан його розробки є темою нашої роботи.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИМЕТРА МСІП

Відомо, що поляризація розсіяного сонячного випромінювання є максимально чутливою до мікрофізичних властивостей аерозольних та хмарних частинок, і без залучення поляриметричних спостережень вирішення проблеми визначення параметрів аерозолу неможливе у принципі [14]. У відповідності до детального аналізу, виконаного в роботі [13], орбітальний інструмент, призначений для точного і комплексного дистанційного зондування аерозолів і хмар, повинен мати кілька вузьких спектральних каналів, розподілених по спектральному інтервалу приблизно від 400 до 2000 нм. Крім того, прилад повинен вимірювати принаймні три перших параметри Стокса в усіх спектральних каналах, причому фотометрична точність вимірювань повинна бути не гіршою за 4 %, а похибка вимірювання ступеня поляризації повинна бути не більшою за 0.1...0.2 %. Сканування вздовж траєкторії польоту повинно дозволити інструменту «побачити» кожен елемент поверхні приблизно під 100 різними спостережними кутами, що кардинально збільшує інформаційний зміст вимірювань [10]. Більш того, висока кутова роздільна здатність дозволить визначити ефективний радіус хмарних крапель з виключно високою точністю [5, 6]. Алгоритми обробки поляриметричних даних повинні включати всі новітні теоретичні розробки [7, 8, 22].

З усіх орбітальних поляриметрів, виготовлених до теперішнього часу, тільки інструмент типу поляриметра APS місії «Глорія» [13] дозво-

ляє здійснити всю сукупність спостережень. За прототип сканувального поляриметра «СканПол» вибрано саме оптичну схему та методику вимірювань інструмента APS. У зв'язку з обмеженими характеристиками платформи «YuzhSat» розробки КБ «Південне» [4], яку планується використати для орбітальної місії «Аерозоль-UA» з інструментами «СканПол» та МСІП, ми обмежились для «СканПол» найінформативнішими каналами —  $\lambda\lambda = 370, 410, 865, 1380, 1610$  нм. Єдиним недоліком інструмента «СканПол» порівняно з поляриметром POLDER Європейського космічного агентства [12] є відсутність панорамних спостережень. Концепцію «СканПол» призначено для високоточних поляриметричних вимірювань, вона допускає спостереження тільки вздовж траєкторії польоту з вузьким полем зору, меншим за  $1^\circ$ . Проте з точки зору кліматичних вимірювань цей недолік не є критичним, і його можна виправити комбінацією інструментів [9, 14].

Саме для задач визначення просторового розподілу аерозолів авторами запропоновано використання мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП як ще одного інструмента космічного проекту «Аерозоль-UA». Поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних каналів з полем зору  $60 \times 60^\circ$ . Три канали є поляризаційними, кожний з яких дозволяє проводити поляриметричні вимірювання трьох параметрів Стокса  $I, Q, U$  в центральних довжинах хвиль  $\lambda\lambda = 410, 555, 865$  нм зі спектральними півширинами  $FWHM = 20$  нм. Два канали МСІП призначені для фотометричних вимірювань у восьми спектральних діапазонах з центральними довжинами хвиль  $\lambda\lambda = 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865$  і  $910$  нм та півширинами  $FWHM = 20...40$  нм.

Спільні вимірювання приладами «СканПол» та МСІП з борту орбітального апарату виконуються таким способом, що поле зору сканера проходить центральною частиною поля зору іміджера. Сканувальний поляриметр «СканПол» за одне сканування оглядає кутову дистанцію вздовж траєкторії польоту від  $-60^\circ$  до  $+50^\circ$  та має миттєве поле зору  $0.5^\circ$ , що у проекції на земну поверхню з висоти 700 км відповідає значенням довжини сканування вздовж проекції орбіти на поверхню Землі 2300 км, ширина поля зору сканування 6 км. При цьому кіль-

кість спостережних кутів одиничної площадки складає близько 220.

Поле зору поляриметра МСІП охоплює  $+30^\circ \dots -30^\circ$  вздовж та упоперек траєкторії польоту, що відповідає площі  $780 \times 780 \text{ км}^2$  у проекції на земну поверхню. Просторова роздільна здатність МСІП складає від 3 км в надирі до 5 км на краю поля зору.

Для вирішення наукових задач, пов'язаних з визначенням фізичних характеристик аерозолів та їхнього просторового розподілу в земній атмосфері, МСІП повинен мати щонайменше вісім спектральних діапазонів, у трьох з яких можливе проведення поляриметричних вимірювань. Основні довжини хвиль та відповідні шукані характеристики аерозолів представлено у таблиці. Символом Р зазначено можливість проведення поляриметричних вимірювань.

#### ОПТИЧНА СХЕМА ІМІДЖЕРА-ПОЛЯРИМЕТРА МСІП

Інтенсивність зображення об'єкта, який досліджується у поляризованому випромінюванні з використанням засобів зображувальної Стокс-поляриметрії має найбільшу інформативність у порівнянні із звичайною фотометрією об'єкта [23]. Параметри Стокса не можуть бути виміряні безпосередньо, вони обчислюються з розв'язку системи [23]:

$$S(x, y) = \begin{bmatrix} S0(x, y) \\ S1(x, y) \\ S2(x, y) \\ S3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(x, y) + I_{90}(x, y) \\ I_0(x, y) - I_{90}(x, y) \\ I_{45}(x, y) - I_{135}(x, y) \\ I_{RS}(x, y) - I_{LC}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}, I_{RS}, I_{LS}$  — відповідно інтенсивності випромінювання з вертикальною, горизонтальною поляризаціями та з поляризаціями під кутами  $45^\circ$  і  $-45^\circ$ , а також з право- та лівоциркулярною поляризацією, виміряні безпосередньо фотометричним методом. Інтенсивності  $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$  можуть бути виміряні за допомогою лінійних поляризаторів, а  $I_p, I_l$  — за допомогою чвертьхвильової пластинки та лінійного аналізатора. Звичайно  $S0 \dots S3 = (I, Q, U, V)$ , тоді кут лінійної поляризації  $AOLP$  та ступінь лінійної поляризації  $DOLP$  можна розрахувати наступним чином:

$$DOLP = p(q^2 + u^2)^{1/2},$$

$$AOLP = v = 0.5 \arctg(u/q),$$

де  $q = Q/I$  та  $u = U/I$  — нормалізовані параметри Стокса вхідного випромінювання.

Зображувальна поляриметрія звичайно дає можливість визначати одночасно параметри вектора Стокса (SFSIP — Snapshot full-Stokes imaging polarimetry) і є потужним інструментом аналізу параметрів вектора Стокса для більшості об'єктів спостережень (поверхня Землі, атмосфера), включаючи нерухомі та рухомі об'єкти в реальному масштабі часу, що дає можливість уникнути тимчасових помилок реєстрації [23].

Одним з видів SFSIP-поляриметрів є поляриметри, основані на поділі падаючого випромінювання по апертурі (DoAP) [11, 16, 19]. В нашій роботі ми зосереджені на розробці специфічного методу побудови поляриметра DoAP. В запропонованому нами поляриметрі просторові варіації стану поляризації модулюються за допомогою чотирьох або більше субапертур з різними поляриметричними конфігураціями модуляцій. Така конфігурація дозволяє одночасно визначати три параметри вектора Стокса.

У роботі [20] авторами було запропоновано концепцію побудови системи зображувального

#### Спектральні діапазони каналів МСІП та їхні характеристики

Номер каналу	Центральна довжина хвилі, нм (півширина, нм)	Параметри, що визначаються
1	410 (20) Р	Поглинання аерозолем та моніторинг сажі (black carbon)
2	443(20)	Поглинання аерозолем та висота аерозольного шару
3	470 (20)	Параметри аерозолу
4	490 (20)	Аерозоль, альbedo поверхні, оптична товщина хмар, показник відбиття від хмар
5	555 (20) Р	Альbedo поверхні
6	670 (20)	Параметри аерозолу
7	865 (40) Р	Рослинність, аерозолі, хмари, особливості поверхні
8	910 (20)	Водяна пара, корекція впливу атмосфери

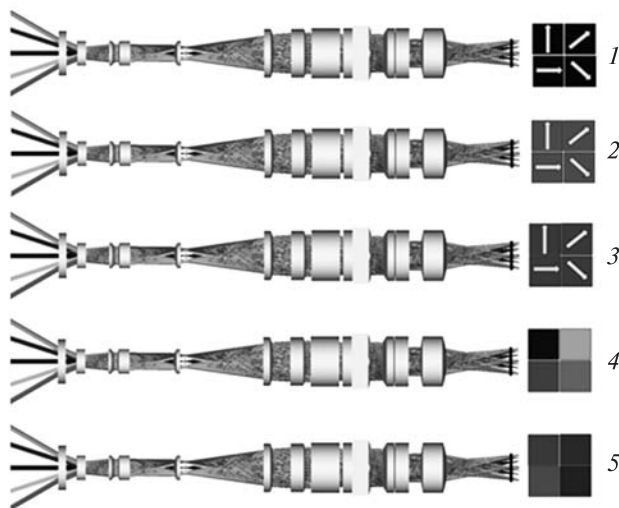


Рис. 1. Схематичне представлення каналів МСІП та принцип побудови зображень: 1 — поляризаційний канал (0°, 45°, 90°, 135°), довжина хвилі 410 нм, півширина 20 нм, 2 — поляризаційний канал (0°, 45°, 90°, 135°), довжина хвилі 555 нм, 3 — поляризаційний канал (0°, 45°, 90°, 135°), довжина хвилі 865 нм, 4 — фотометричний канал с довжинами хвиль 410, 443, 470, 490 нм, 5 — фотометричний канал с довжинами хвиль 555, 670, 865, 910 нм

астрономічного поляриметра, що дозволяє проводити вимірювання складових вектора Стокса одночасно в широкому полі зору і без обмежень по відносному отвору системи. Таку схему було обрано як прототип поляриметра МСІП. Загалом МСІП складається з п'яти оптичних каналів, три з яких поляризаційні, а два — фотометричні (див. таблицю).

На рис. 1 наведено схематичне зображення каналів яке ілюструє принцип побудови зображень у фокальній площині поляриметра. З фотометричної точки зору всі канали МСІП розділено на дві групи — короткохвильові (400...500 нм) і довгохвильові (500...920 нм). Камери обох груп подібні та максимально уніфіковані.

У склад кожного із поляризаційних оптичних каналів входять: ширококутний вхідний об'єктив для формування заданого поля зору на польовій діафрагмі, коліматор, що формує систему паралельних променів для проходження блоку «поляроїд — фільтр — призми», композитний поляризаційний елемент, що розділяє вихідну знічку на чотири сегменти, фільтр для виділення робочої до-

вжини хвилі каналу, ахроматичні призми для розведення чотирьох зображень поля зору, камерний об'єктив для формування зображень поля зору.

У складі кожної оптичної системи фотометричного каналу також є складовий спектральний фільтр, що виконує ту ж функцію — розділює вихідну знічку на чотири сегменти.

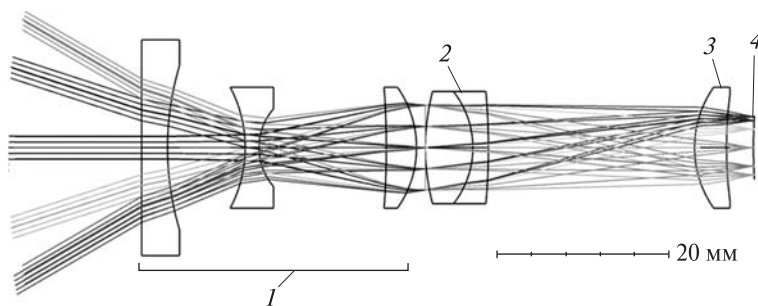
Вхідну частину каналів МСІП (рис. 2) сформовано за класичною схемою ширококутного інвертованого телефотооб'єктива. Вона складається з двох частин: обернена система Галілея та власне об'єктив з апертурною діафрагмою біля нього.

Система Галілея розширює поле зору, а її потужний від'ємний компонент формує негативну кривину поля всієї системи. Завдяки цьому конструкція камерного об'єктива може бути спрощена до двокомпонентного, у відповідності із рекомендаціями роботи [3].

Важливою особливістю системи МСІП є не повна корекція хроматизму. Згідно з теоремою Слюсарєва [3] у системі значної довжини, тобто з розсунутими компонентами, обидва хроматизми (положення і збільшення) можуть бути виправлені лише при корекції всіх компонентів, тобто потрібне значне ускладнення системи. Але поляриметр МСІП має працювати у вузьких спектральних каналах, тому для кожного каналу хроматизм збільшення не впливає на якість зображення. Ця обставина дає змогу суттєво спростити систему. Такий прийом передбачає появу хроматичної дисторсії, різної для різних каналів, але вона невелика (до 140 мкм) і її можна програмно компенсувати при подальшій обробці.

Згідно з формулою (1) для аналізу лінійної поляризації необхідно виконати чотири вимірювання інтенсивностей випромінювання, що пройшли через аналізатори поляризації. У загальному випадку можливі різні варіанти реалізації таких аналізаторів. Перший з них — застосування пари двопробних поляризаційних призм, оптичні осі яких розміщені під кутом 45° і заповнюють сектори 1—2 і 3—4 відповідно. Вони мають ефективність, близьку до 100 %. Така призма (Wedged double Wollaston) була запропонована в роботі [17]. Аналогічні системи описані в роботах [15, 19], де, крім масиву призм Волластона, як аналізатор по-

Рис. 2. Ширококутний вхідний об'єктив: 1 — система Галілея, 2 — об'єктив, 3 — колектив, 4 — діафрагма поля зору



ляризації застосовуються ще й чвертьхвильові пластинки для визначення всіх параметрів Стокса. Однак власна дисперсія призми вимагає введення додаткових компенсаційних клинів і не може дати якісне зображення у великому полі зору і широкому спектральному діапазоні.

Слід зазначити, що дисперсія призми є різною для двох ортогональних напрямків поширення світла, що призводить до неідентичності зображень. В іншому варіанті такого аналізатора поляризації використовуються тонкі поляризаційні плівки. У порівнянні з двопробневими поляризаційними призмами Волластона плівки мають гірший коефіцієнт пропускання, який зменшується до 47 % в діапазоні 420...800 нм. Однак при широкому полі зору і врахуванні віньетування косих польових променів на межі дотику призми плівки є кращими, ніж двопробневі поляризаційні призми, зокрема у зв'язку з меншою товщиною.

У запропонованій схемі використовується секторний поляризатор, що складається з чотирьох плівкових поляризаторів з позиційними кутами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $135^\circ$ . Схему такого секторного поляризатора, встановленого поблизу вихідної зіниці оптичного каналу МСІП, показано на рис. 3.

Ми розробили секторний поляризатор на основі комерційних поляризаційних плівок [1]. Вказані плівки були орієнтовані з позиційними кутами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , а потім заклеєні між двома захисними вікнами (див. рис. 3, а та б). Ступінь затемнення того чи іншого сектора ілюструє роботу поляризаційного елемента. Повне затемнення у секторі відповідає випадку, коли вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно перпендикулярні, світлий сектор — вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна

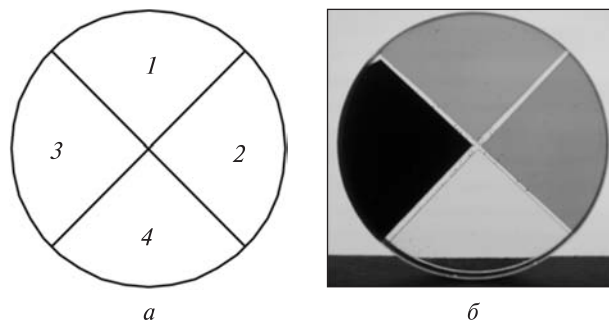


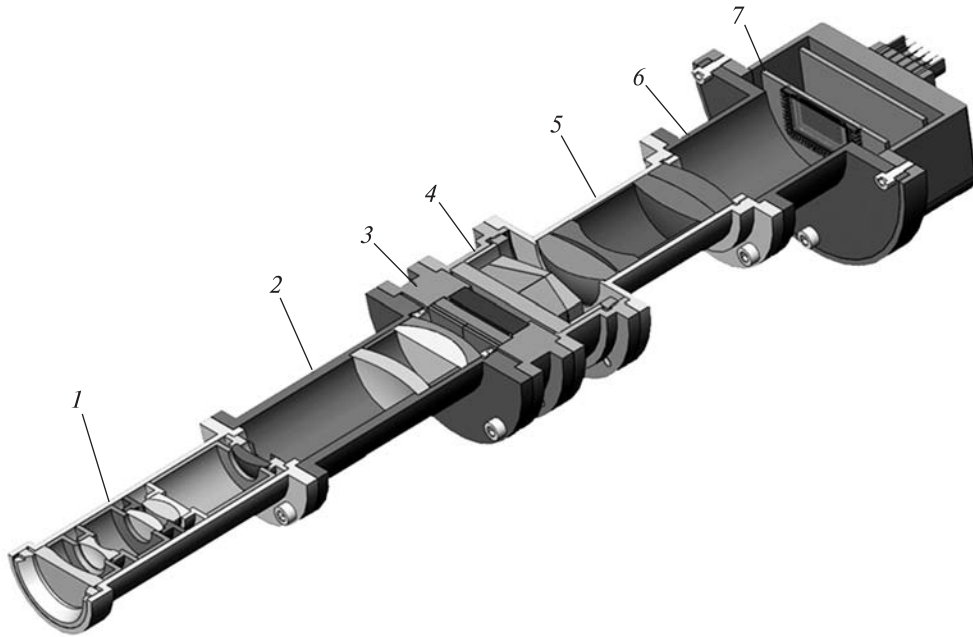
Рис. 3. Секторний поляризатор іміджера-поляриметра: а — орієнтація поляризаційних елементів (1 —  $0^\circ$ , 2 —  $90^\circ$ , 3 —  $45^\circ$ , 4 —  $135^\circ$ ), б — зображення складового поляроїда на основі поляризаційних плівок

вісь поляроїда взаємно паралельні.

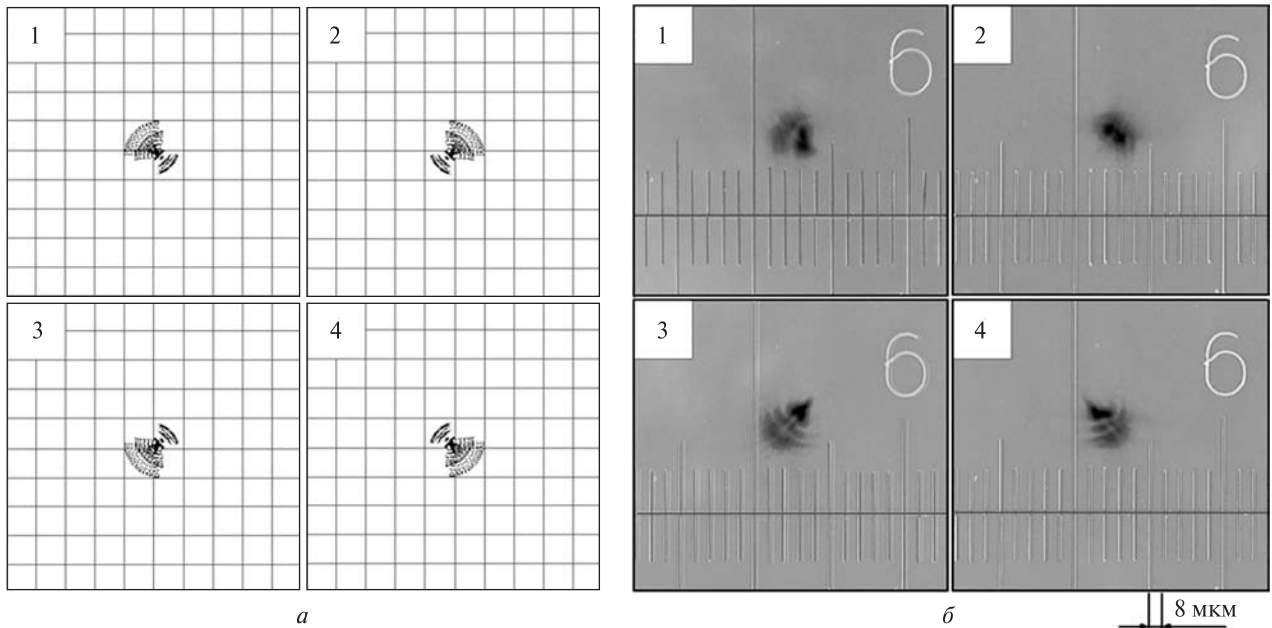
Для розведення чотирьох зображень спостережуваного об'єкта використовується система відхиляючих призми, ахроматизованих для діапазону 400...900 нм. Система складається з двох склеєних клинів зі стекол К108-Ф101 у кожному каналі. З метою досягнення максимальної технологічності виробництва у поляриметри МСІП усі канали були уніфіковані для обох діапазонів, 500...900 нм та 400...500 нм. В результаті усі канали МСІП відрізняються лише останньою склеюючою камерного об'єктива.

Останній елемент каналу МСІП — камерний об'єктив — проектує рознесені зображення польової діафрагми з коефіцієнтом збільшення близько  $-1$  у фокальну площину. Загальний розмір чотирьох зображень становить близько  $15 \times 15$  мм, що і визначає необхідний розмір приймача з розміром пікселя 7...10 мкм.

#### КОНСТРУКЦІЯ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ МСІП



**Рис. 4.** Загальний вигляд оптичного каналу мультиспектрального іміджера-поляриметра (поляриметричний канал 555 нм) у розрізі: 1 – вхідний об’єктив, 2 – коліматор, 3 – поляризатор та фільтр, 4 – блок клинів, 5 – камерний об’єктив, 6 – проміжний фланець, 7 – ПЗЗ-камера



**Рис. 5.** Теоретичні (а) та реальні (б) плями розсіювання осьової точки для кожного із чотирьох (1, 2, 3, 4) субканалів оптичного каналу 555 нм. Одна поділка на шкалі відповідає розміру 8 мкм

У зв'язку з необхідністю уніфікації оптичних схем каналів поляриметра МСІП як коротко- так і довгохвильового діапазонів усі канали мають майже однакову конструкцію, яка відрізняється лише деякими відстанями між лінзами. Конструктивно поляриметр МСІП є сукупністю вузлів, показаних на рис. 4. Ці вузли з'єднуються за допомогою фланців. Габарити одного каналу: довжина — 302 мм, найбільший діаметр — 86 мм (фланець камери), сумарна маса усіх п'яти каналів — 4 кг. Загальний вигляд конструкції окремого каналу показано на рис. 4.

Виходячи з розробленої та змодельованої конструкції мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП, було виготовлено один спектральний канал, який пройшов перші необхідні етапи перевірки основних характеристик. До основних характеристик, що були перевірені, можна віднести: якість плями розсіювання для кута поля зору  $0^\circ$  (осьова точка); правильність розташування зображень на приймачі випромінювання та відсутність накладень зображень, що формуються суміжними каналами; загальна якість зображення по полю зору.

На рис. 5, а представлено розрахункові плями розсіювання кожного із чотирьох субканалів поляриметричного каналу 555 нм. Асиметричність плями розсіювання пов'язана головним чином з тим, що для кожного субканалу вона формується за допомогою  $1/4$  зіниці приладу. Згідно з вимірною функції концентрації енергії у плямі розсіювання діаметр розрахункової плями розсіювання становить близько 28 мкм при концентрації енергії 90 %. Реальні розміри плями розсіювання (рис. 5, б), одержані при дослідженні оптичного каналу не перевищують 30 мкм. Для досліджень каналу МСІП ми використовуємо камеру SBIG STL-1301E.

Також слід відмітити, що при більш детальному дослідженні периферійних зон зображення накладення сусідніх зображень немає, але останнє буде досліджено детальніше у подальшому випробуванні каналів МСІП.

## ВИСНОВКИ

У роботі представлено результати розробки мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП

для досліджень мікрофізичних характеристик аерозолу в атмосфері в космічному проекті «Аерозоль-UA». Наведено основні технічні вимоги до загальної оптичної схеми поляриметра МСІП. Запропоновано власну концепцію оптичної схеми іміджера-поляриметра, яка базується на принципі поділу вхідного зображення на чотири квазіідентичні вторинні зображення. Такий підхід дозволяє уніфікувати оптичну схему каналів поляриметра, яка дозволяє трансформувати поляризаційний канал у фотометричний канал з чотирма субканалами із різними спектральними діапазонами. Така трансформація виконується заміною секторного поляризатора на секторний фільтр з чотирма різними довжинами хвиль у кожному секторі. Загалом поляриметр МСІП складається з п'яти оптичних блоків, три з яких поляризаційні, два інші — фотометричні. Проведено розрахунок та оптимізацію кожної із оптичних схем та моделювання механічної конструкції поляриметра. Виготовлено, складено та від'юстовано експериментальний зразок одного з оптичних каналів поляриметра МСІП. Попередні результати дослідження продемонстрували збіг теоретичних та експериментальних розрахунків оптичної схеми каналів МСІП. Слід зауважити, що дослідження проводилися без поляризаційного елемента.

Подальші етапи будуть пов'язані з лабораторним дослідженням та калібруванням поляризаційних характеристик МСІП, зокрема оцінюванням інструментальної поляризації та визначення можливостей її врахування.

*Роботу виконано за фінансової підтримки проекту «Аерозоль-UA» (NAS) Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2017 рр., проекту 16БФ051-02 Київського національного університету імені Тараса Шевченка, гранту Ф73/36-2017 Державного фонду фундаментальних досліджень.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Синявський І. І. Розробка поляризатора зображувального поляриметра на основі поляризаційних плівок // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 4. — С. 19—23.

2. Синявський І. І., Міліневський Г. П., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Данилевський В. О., Розенбуш В. К., Бовчалоук А. П., Луценюк А. А., Шимків А. П., Міщенко М. І. Методика, апаратне забезпечення та валідація супутникових досліджень атмосферного аерозолу: перші результати підготовки до космічного експерименту «Аерозоль-УА» // Космічна наука та технологія. — 2015. — **21**, № 3. — С. 9—17.
3. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1975. — 640 с.
4. Смердов Е. И., Вайсеро М. В., Добрушина М. Г., Кавун В. В. Особенности интеграции микроспутниковой платформы «YuzhSat» с различными типами полезной нагрузки // 17 Укр. конф. по космич. исслед.: Сб. тез. докл. — Одесса, 2017. — С. 145.
5. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I. Rainbow Fourier transform // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2012. — **113**. — P. 2521—2535.
6. Bréon F. M., Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 1879—1882.
7. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multiangle polarimetric satellite observations // Atmos. Meas. Technol. — 2011. — **4**. — P. 975—1018.
8. Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Herman M., Fuertes D., Ducos F., Torres B., Derimian Y., Huang X., Lopatin A., Chaikovskiy A., Aspetsberger M., Federspiel C. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere // SPIE Vol. Newsroom. — 2014. — doi: 10.1117/2.1201408.005558.
9. Hansen J., Rossow W., Carlson B., Lacis A., Travis L., Del Genio A., Fung I., Cairns B., Mishchenko M., Sato M. Low cost long term monitoring of global climate forcings and feedbacks // Climatic Change. — 1995. — **31**. — P. 247—271.
10. Kokhanovsky A. A., Davis A. B., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O. P., Sano I., Mukai S., Rozanov V. V., Litvinov P., Lapyonok T., Kolomiets I. S., Oberemok Y. A., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F. A., Rietjens J., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multiangle spectro-polarimetric frontier // Earth-Sci. Rev. — 2015. — **145**. — P. 85—116.
11. Llull P., Myhre G., Pau S. Lens array Stokes imaging polarimeter // Meas. Sci. Technol. — 2011. — **22**. — 065901
12. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskiy I., Mishchenko M., Rosenbush V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere // Acta astronaut. — 2016. — **123**. — P. 292—300.
13. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2007. — **88**. — P. 677—691.
14. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Liu L., Lacis A., Cairns B., Travis L. Toward unified satellite climatology of aerosol properties: what do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us? // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2009. — **110**. — P. 402—408.
15. Mu T., Zhang C., Liang R. Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array // J. Opt. — 2015. — **17** (12). — 125708.
16. Mu T., Zhang C., Li Q., Liang R. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters // Opt. Express. — 2015. — **23**. — P. 10822—10835
17. Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1997. — **123**, N 3. — P. 589—592.
18. Perreault J. D. Triple Wollaston-prism complete-Stokes imaging polarimeter // Opt. Lett. — 2013. — **38** (19). — P. 3874—3877.
19. Pezzaniti J. L., Chenault D. B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter // Proc. SPIE. — 2005. — **5888**. — 58880V.
20. Sinyavskii I. I., Ivanov Yu. S., Vid'machenko A. P. Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes // J. Opt. Technol. — 2013. — **80** (9). — P. 545—548.
21. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., Dubovik O., Ducos F., François P., Goloub P., Herman M., Lifermann A., Waquet F. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission // Atmos. Meas. Technol. — 2011. — **4**. — P. 1383—1395.
22. Torres B., Dubovik O., Fuertes D., Schuster G., Cachorro V. E., Lapyonok T., Goloub P., Blarel L., Barreto A., Mallet M., Toledano C., and Tanré D. Advanced characterisation of aerosol size properties from measurements of spectral optical depth using the GRASP algorithm // Atmos. Meas. Technol. — 2017. — **10**. — P. 3743—3781.
23. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Appl. Opt. — 2006. — **45** (22). — P. 5453—5469.

Стаття надійшла до редакції 09.01.18

## REFERENCES

1. Vidmachenko A. P., Ivanov Yu. S., Syniavskiy I. I. The development of the imaging polarimeter's polarizer on the



- basis of the polarizing film. *Kosm. nauka tehnol.*, **21** (4), 19–23 (2015) [in Ukrainian].
2. Syniavskiy I. I., Milinevsky G. P., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. H., Danylevsky V. O., Rozenbush V. K., Bovchalyuk A. P., Lukenyuk A. A., Shymkiv A. P., Mishchenko M. I. Methodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the AEROSOL-UA space experiment development. *Kosm. nauka tekhnol.*, **21** (3), 9–17 (2015) [in Ukrainian].
  3. Sliusarev G. G. Raschet opticheskikh system [Design of optical system]. 640 p. (Mashinostroenie, L., 1975) [in Russian].
  4. Smerdov E. I., Vajsero M. V., Dobrushyna M. G., Kavun V. V. Osobennosti integracii mikrosputnikovoj platformy «YuzhSat» s razlichnymi tipami poleznoj nagruzki [Features of the integration of the «YuzhSat» micro satellite platform with various types of payload] *17<sup>th</sup> Ukrainian Conference on Space Research: Abstracts*, P. 145 (Odesa, 2017) [in Russian].
  5. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I. Rainbow Fourier transform. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **110**, 402–408 (2009).
  6. Bréon F. M., Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1879–1882 (1998).
  7. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanr D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced re-trieval of aerosol properties from spectral multi-angle polari-metric satellite observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 975–1018 (2011).
  8. Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Herman M., Fuertes D., Ducos F., Torres B., Derimian Y., Huang X., Lopatin A., Chaikovskiy A., Aspetsberger M., Federspiel C. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere. *SPIE Vol. Newsroom*, doi:10.1117/2.1201408.005558 (2014).
  9. Hansen J., Rossow W., Carlson B., Lacis A., Travis L., Del Genio A., Fung I., Cairns B., Mishchenko M., Sato M. Low cost long term monitoring of global climate forcings and feedbacks. *Climatic Change*, **31**, 247–271 (1995).
  10. Kokhanovsky A. A., Davis A. B., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O. P., Sano I., Mukai S., Rozanov V. V., Litvinov P., Lapyonok T., Kolomiets I. S., Oberemok Y. A., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F. A., Rietjens J., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multi-angle spectro-polarimetric frontier. *Earth-Sci. Rev.*, **145**, 85–116 (2015).
  11. Llull P., Myhre G., Pau S. Lens array Stokes imaging polarimeter. *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 065901 (2011).
  12. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskiy I., Mishchenko M., Rosenbush, V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, **123**, 292–300 (2016).
  13. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission. *Bull. Amer. Meteorological Soc.*, **88**, 677–691 (2007).
  14. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Liu L., Lacis A., Cairns B., Travis L. Toward unified satellite climatology of aerosol properties: what do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us?. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, **110**, 402–408 (2009).
  15. Mu T., Zhang C., and Liang R. Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array. *J. Opt.*, **17** (12), 125708 (2015).
  16. Mu T., Zhang C., Li Q., and Liang R. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters. *Opt. Express*, **23**, 10822–10835 (2015).
  17. Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, **123** (3), 589–592 (1997).
  18. Perreault J. D. Triple. Wollaston-prism complete-Stokes imaging polarimeter. *Opt. Lett.*, **38** (19), 3874–3877 (2013).
  19. Pezzaniti J. L., Chenault D. B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter. *Proc. SPIE*, **5888**, 58880V (2005).
  20. Sinyavskii I.I., Ivanov Yu. S., Vid'machenko A. P. Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes. *J. Opt. Technol.*, **80** (9), 545–548 (2013).
  21. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., Dubovik O., Ducos F., François P., Goloub P., Herman M., Lifermann A., Waquet F. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission. *Atmos. Meas. Technol.*, **4**, 1383–1395 (2011).
  22. Torres B., Dubovik O., Fuertes D., Schuster G., Cachorro V. E., Lapyonok T., Goloub P., Blarel L., Barreto A., Mallet M., Toledano C., Tanré D. Advanced characterisation of aerosol size properties from measurements of spectral optical depth using the GRASP algorithm. *Atmos. Meas. Technol.*, **10**, 3743–3781 (2017).
  23. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of passive imaging polarimetry for remote

sensing applications. *Appl. Opt.*, **45** (22), 5453–5469 (2006).

*Received 09.01.18*

*I. I. Siniavskiy*<sup>1</sup>, *Yu. S. Ivanov*<sup>1</sup>,  
*M. G. Sosonkin*<sup>1</sup>, *G. P. Milinevskiy*<sup>1,2,3</sup>, *G. V. Koshman*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Главная астрономическая обсерватория  
Национальной академии наук Украины, Киев,  
Украина

<sup>2</sup> Международный центр науки будущего,  
Цзилинский университет, Чанчунь, Китай

<sup>3</sup> Киевский национальный университет  
имени Тараса Шевченка, Киев, Украина

### МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ИМИДЖЕР-ПОЛЯРИМЕТР КОСМИЧЕСКОГО ПРОЕКТА «АЭРОЗОЛЬ-УА»

Рассмотрен процесс создания мультиспектрального имиджера-поляриметра (МСИП), как одного из инструментов космического проекта «Аэрозоль-УА». Назначением поляриметра МСИП является изучение глобального распределения физических свойств аэрозольных частиц и облачных образований в атмосфере Земли по измерениям поляризационных и спектральных характеристик рассеянного солнечного излучения. Рассмотрены основные характеристики МСИП, необходимые для проведения эксперимента, предложено построение оптической схемы каналов поляриметра, которая позволяет определять линейную поляризацию излучения и проводить фотометрические измерения. Приведены результаты испытания экспериментального образца одного из оптических каналов имиджера-поляриметра и проведения и анализ его характеристик.

**Ключевые слова:** аэрозоли, изображающий поляриметр, космический эксперимент.

*I. I. Siniavskiy*<sup>1</sup>, *Yu. S. Ivanov*<sup>1</sup>,  
*M. G. Sosonkin*<sup>1</sup>, *G. P. Milinevskiy*<sup>1,2,3</sup>, *G. V. Koshman*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Main Astronomical Observatory, National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> International Center of Future Science, Jilin University,  
Changchun, China

<sup>3</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv,  
Ukraine

### MULTISPECTRAL IMAGER-POLARIMETER OF THE SPACE PROJECT AEROSOL-UA

Aerosols are the least studied components of the atmosphere that is resulting in uncertainty in the assessment of the impact of aerosols on the radiative balance of the Earth atmosphere. Moreover, information on the global distribution of anthropogenic aerosols is sparse, which makes it extremely difficult to test and improve aerosol transport patterns in the atmosphere and progress in understanding the human impact on climate and the environment. Following the unsuccessful launch of the Glory mission in 2011, there was a gap in the existence of up-to-date aerosol orbital instruments, because launches of similar types of devices were scheduled for 2019 and later. This is one of the reasons that we consider a scientific space project with ScanPol aerosol scanning polarimeter and a wide-angle multispectral imager-polarimeter (MSIP) on board the spacecraft as a timely mission that will produce the required microphysical and chemical parameters by defining the indicator refraction index of the natural and anthropogenic aerosols. The main purpose of the MSIP is to carry out polarimetric and photometric measurements of scattered solar radiation in order to have information on the characteristics of aerosols, as well as to determine the influence of clouds on measurements with the ScanPol polarimeter. We propose the concept of the MSIP optical layout, which is based on the principle of splitting the input image into four quasi-identical secondary images. This approach allows us to unify the optical layout of polarimeter channels, which allows, in own turn, to transform the polarization channel into a photometric channel with four subchannels with different spectral ranges. This transformation is performed by replacing the sector polarizer with a sector filter with four different wavelengths in each sector. The MSIP consists of five optical channels with a field of view  $60 \times 60^\circ$ . The three channels are polarizing, each of which allows to perform polarimetric measurements of the three Stokes  $I$ ,  $Q$ ,  $U$  parameters at the central wavelengths of 410, 555, 865 nm with a spectral half-width of 20 nm FWHM. Two channels of MSIP are intended for photometric measurements in eight spectral bands with center wavelengths of 410, 443, 470, 490, 555, 670, 865, and 910 nm with spectral half-widths of 20 to 40 nm FWHM. The calculation and optimization of each of the optical layouts and the modeling of the mechanical construction of the polarimeter are performed. An experimental sample of one of the optical channels of the MSIP has been manufactured, compiled and verified. The preliminary results demonstrate the convergence of theoretical and experimental data. It should be noted that the studies were conducted without a polarizing element. The next steps will be related to the laboratory testing and calibration of the MSIP polarization characteristics..

**Keywords:** aerosols, imaging polarimeter, space experiment.