

# АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

з виконання наукового проекту

Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на  
2012–2016 рр.

”Методика і апаратне забезпечення дослідження атмосферного аерозолю та валідації супутникових досліджень аерозолю та озону в атмосфері Землі” – проект наземної підтримки космічного експерименту «Аерозоль-UA (NAS)».

**Етап 3 "Розробка та випробування макета ОМБ поляриметра СканПол"**

Договір № 3/15, 300 тис. грн.

## 1. Вступ

Вплив аерозольних частинок, зважених в земній атмосфері, на екологію і клімат за багатьма оцінками можна порівняти за величиною з ефектом парникових газів. Разом з тим аерозолі є найменш вивченим компонентом атмосфери, в результаті чого існуюча невизначеність в оцінці впливу аерозолів на радіаційний баланс Землі недопустимо велика. Після невдачі з запуском космічної місії НАСА “Glory” спеціальні орбітальні інструменти для детального вивчення властивостей аерозолю плануються не раніше 2020 року. Нами був запропонований науковий космічний проект Аерозоль-UA, кінцевою метою якого є здійснення запуску на орбіту Землі спеціального супутника з скануючим поляриметром (СканПол) та мультиспектральним зображуючим поляриметром (МСЗП) на борту для вимірювання детальних фізичних характеристик природних та антропогенних аерозолів і оцінки їхнього хімічного складу.

Відповідно до договору головним його завданням була розробка макета оптико-механічного блоку поляриметра СканПол та технічних умов на мультиспектральний зображуючий поляриметр МСЗП.

## 2. Поляриметр СканПол космічного експерименту Аерозоль–UA

Скануючий поляриметр СканПол місії Аерозоль-UA базується на концепції космічної місії НАСА Глорі, метою якої був моніторинг просторового і часового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів в атмосфері Землі за допомогою поляриметра APS. У поляриметрі СканПол кількість спектральних каналів зменшено до шести у порівнянні з поляриметром APS, але введено новий спектральний канал у ближньому УФ діапазоні з довжиною хвилі  $\lambda = 370$  нм.

Орбітальний скануючий 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 діапазоні фазових кутів з фотометричною точністю 4% та поляриметричною точністю 0.2%. Згідно до завдань договору була розроблена оптична схема поляриметра (рис. 1а). Поляриметр СканПол складається з скануючої дводзеркальної системи (рис. 1а (1–

4)), призначеної для передачі сонячного випромінювання, розсіяного досліджуваними ділянками системи атмосфера – поверхня, на вхідні зіниці всіх оптичних блоків одночасно. Скануюча система має пару дзеркал, що утворюють поляризаційно нейтральну комбінацію, яка робить близько 40 обертів за хвилину у площині орбіти космічного апарата. Кутовий діапазон сканування поверхні Землі складає від  $+50^\circ$  до  $-60^\circ$  відносно напрямку в надир. 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  $\lambda = 370\dots555$  нм, а два (IR-1, IR-2) – у близькій ІЧ-ділянці спектру з робочим спектральним діапазоном  $\lambda = 865\dots1610$  нм (див. рис. 1а).

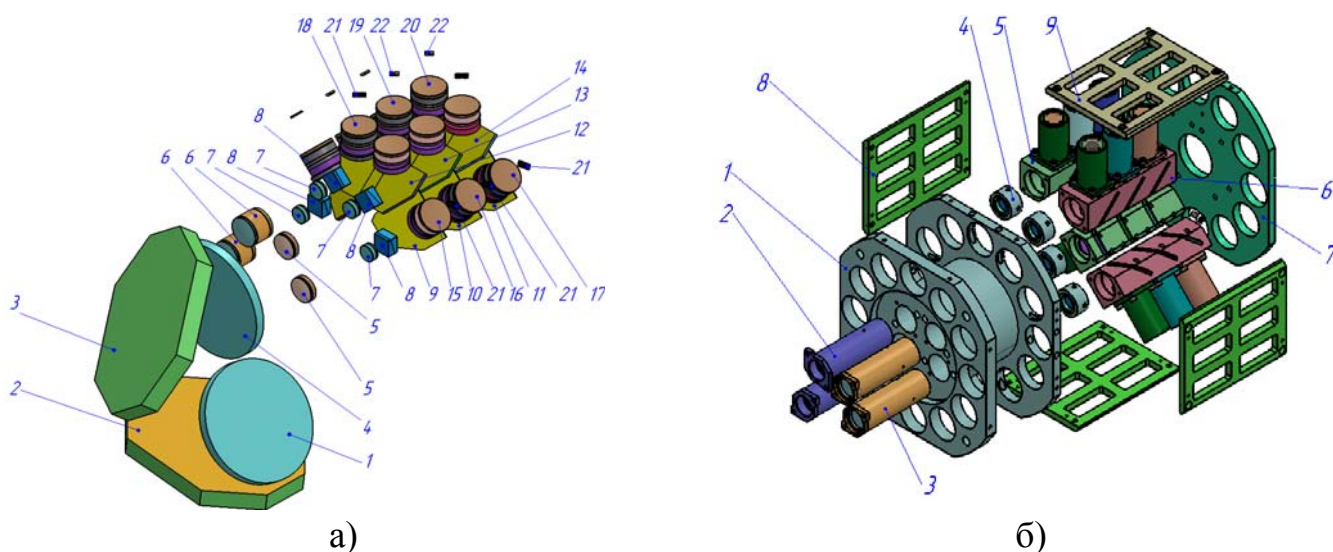


Рисунок 1 – Оптична схема (а) поляриметра СканПол: 1–4 – скануюча дзеркальна система, 5 – вхідний об’єктив оптичного блоку VIS, 6 – вхідний об’єктив оптичного блоку IR, 7 – коліматор, 8 – призма Воластона, 9–14 – дихроїчні дзеркала відповідних спектральних діапазонів, 15–20 – система камерних об’єктивів та інтерференційних фільтрів для відповідних спектральних каналів, 21 – приймач випромінювання для видимого спектрального діапазону, 22 – приймач випромінювання для ІЧ-діапазону. Загальний вигляд (б) 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 Воластона, 5 – вузол спектральної селекції та камерних об’єктивів VIS, 6 – вузол спектральної селекції та камерних об’єктивів IR, 7 – фланець, 8–9 – бокові пластини.

Спектральні канали поляриметра блоків VIS використовуються для оцінки поглинальної здатності тропосферного аерозолі та його вертикального розподілу (максимум пропускання на  $\lambda = 370$  нм, напівширина діапазону пропускання  $\Delta\lambda = 10$  нм), зондування аерозолі над океаном та землею поверхнею ( $\lambda = 410$  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 цирів і стратосферних аерозолів та 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).

Кожен з оптичних блоків поляриметра (рис. 1а) складається з наступних елементів (попередньо, по ходу променя від скануючої системи): вхідного об'єктива, що формує проміжне зображення досліджуваного об'єкта; польової діафрагми; коліматора; призми Воластона, 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; камерних об'єктивів, які формують по два зображення ( $S$  і  $P$ ) на приймачах випромінювання.

Проведено також детальний аналіз та комп'ютерне моделювання оптико-механічного блоку приладу СканПол. На рис. 1б показано його конструкцію, яка задовольняє 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 1б основні елементи рознесені в просторі.

Основною функцією вузла вхідного об'єктива та коліматора (рис. 2а) 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 Воластона. Конструкція вказаного вузла розроблена таким чином, що дозволяє складати та юстувати кожен вузол окремо з чіткою фіксацією необхідного кутового поля зору системи.

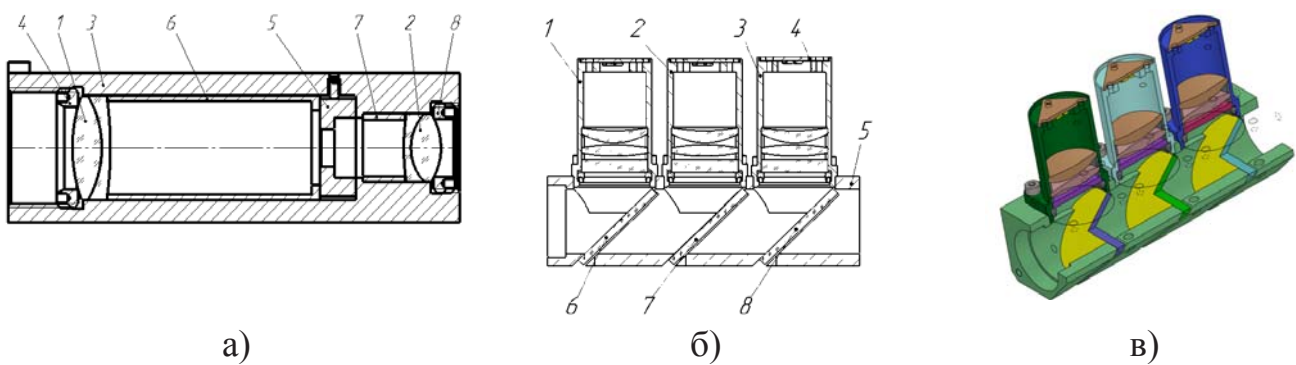


Рисунок 2 – Ескіз вузла (а) вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS: 1 – вхідний об'єктив, 2 – коліматор, 3 – корпус, 4,8 – елементи фіксації, 5 – діафрагма, 6, 7 – проміжні кільця. Ескіз (б) та модель у перерізі (в) вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS: 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.

На рис. 2 показано ескіз вузла спектральної селекції та камерних об'єктивів оптичного блоку VIS. Вузол конструктивно містить корпус, в якому закріплені дихроїчні дзеркала та до якого також кріпляться камерні об'єктиви. При складанні

оптико-механічного блоку конструкція стягується боковими пластинами (див. рис. 1б), що відіграють роль ребер жорсткості.

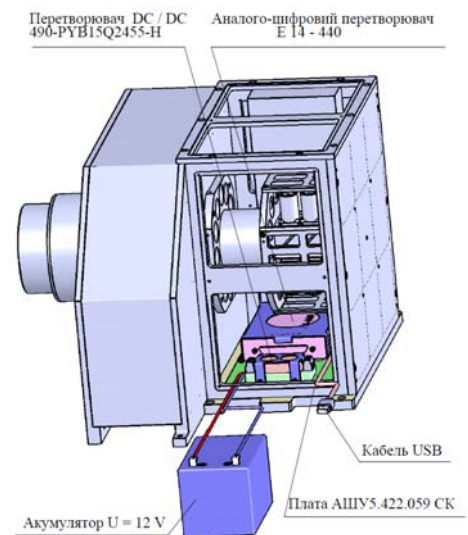
Попереднє дослідження блоку скануючих дзеркал показало, що запропонована комбінація дзеркал дійсно компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Остаточна величина поляризації залежить від довжини хвилі (у “синій” ділянці спектру збільшена на 0.6 %), та від кута поля зору (до 0.2 %). Ця величина може бути врахована калібруванням приладу.

Приймачі світла багатоканального зчитувача оптичної інформації СканПол розташовані на модулях каналних перетворювачів світла зчитувача оптичної інформації (рис. 2б, 2в та рис. 3).

**Співвиконавець** за Договором Львівський центр Інституту космічних досліджень (ЛЦКД) НАН України та НКА України (**90 тис. грн.**) розробив та виготовив макет багатоканального зчитувача оптичної інформації, який забезпечує перетворення потоку світла у визначених вище спектральних діапазонах в електричний сигнал з використанням фотодіодів та оцифрування даних вимірювань світлових потоків.



а)



б)

Рисунок 3 – Модуль E14-440 AD/DA Converter для перетворення аналогового сигналу з фотодіодів у цифрову форму (а), та схема розміщення перетворювача для макету СканПол (б).

Також співвиконавцем ЛЦКД було розроблено та виготовлено модулі каналних перетворювачів світла, запропоновано схему розміщення перетворювача для макету СканПол для випробувань на літаку (рис. 4а), а для перетворення аналогового сигналу з фотодіодів у цифрову форму було використано модуль E14-440 AD/DA Converter (рис. 3а).

**Співвиконавець** за Договором Інститут електродинаміки НАН України (**90 тис. грн.**) розробив та виготовив спеціальний безконтактний двигун для обертання скануючих дзеркал (рис. 4а, 4б та 4в).



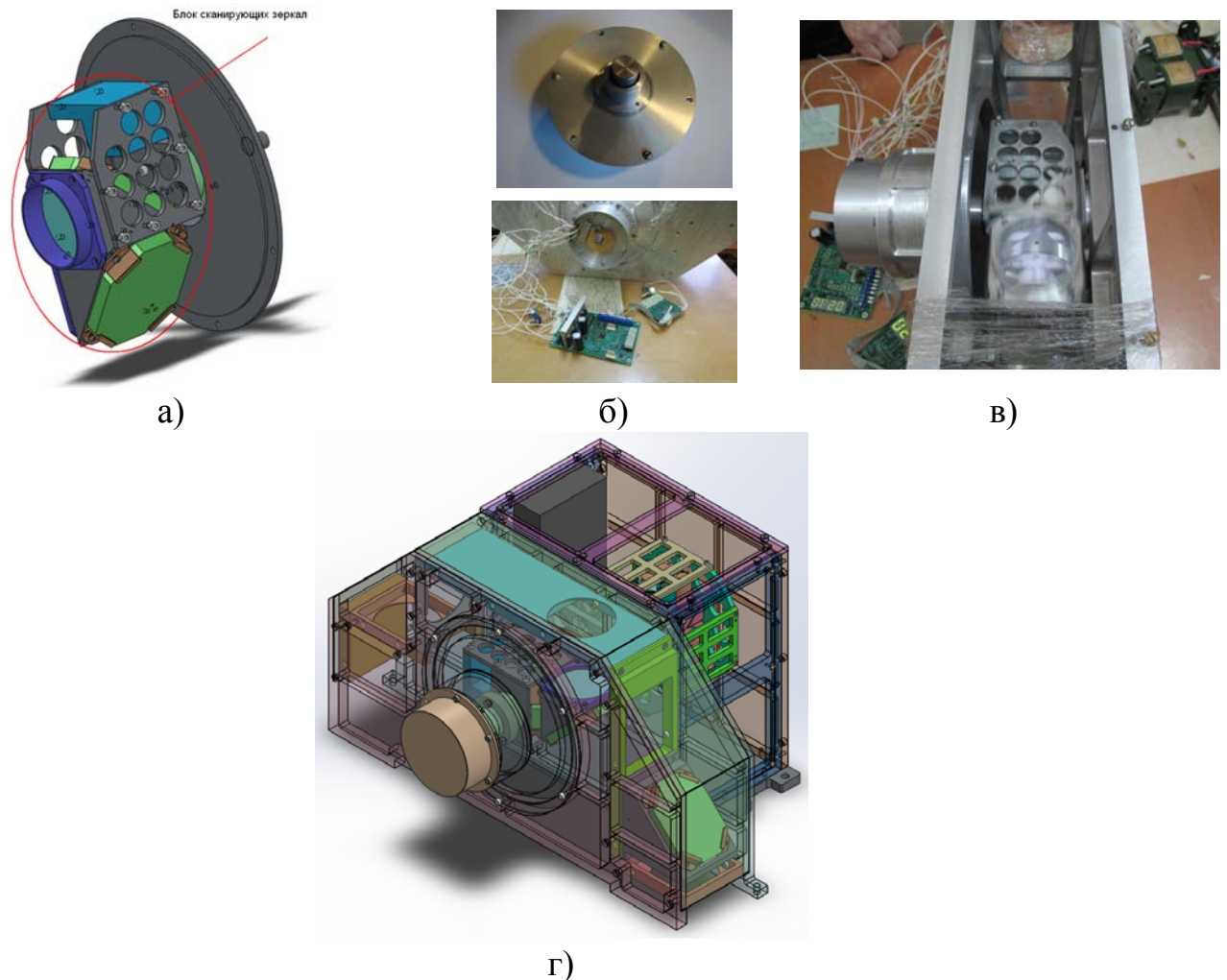


Рисунок 4 – Дизайн (а) блоку скануючих дзеркал поляриметра СканПол, (б, в) безконтактний двигун для вузла обертання дзеркал. Макет скануючого поляриметра (г) СканПол для випробувань з літака.

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.

### 3. Розробка концепції та технічних умов на мультиспектральний зображуючий поляриметр

Згідно завдань Договору була розроблена концепція та технічні умови мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП, який повинен реєструвати умови хмарності та виконувати географічну прив'язку області скануючого поляриметра для коректної інтерпретації даних. Чотириканальний поляриметр МСЗП буде отримувати зображення підсупутникової сцени з інформацією про стан атмосфери (хмарність) і поверхні (неоднорідність поверхні, поверхня суші, водна поверхня) для визначення аерозольної оптичної товщини і поляризаційних властивостей аерозолю шляхом реєстрації трьох параметрів Стокса одночасно у трьох спектральних каналах 410, 555, 865 нм (див. рис. 5). Поляриметр

МСЗП має також один канал для визначення інтенсивності який розбитий на чотири спектральні канали: 410, 555, 865, 936 нм. Поле зору кожного каналу  $60^\circ \times 60^\circ$  ( $770 \times 770 \text{ км}^2$ ) з просторовою роздільною здатністю 0.5 км. Частота знімання поляриметра МСЗП складає від  $1.5 \text{ с}^{-1}$  до  $6.0 \text{ с}^{-1}$  в залежності від швидкості каналу передачі даних, час експозиції  $< 0.5 \text{ с}$ . Калібрування поляризаційних властивостей поляриметра МСЗП буде виконуватись на борту супутника за допомогою скануючого поляриметра СканПол, точність визначення ступеня поляризацію очікується не гірше 1%.

Діаметр апертури каналів поляриметра МСЗП дорівнює 22 мм, загальна довжина камери 300 мм, розмір матриці  $1000 \times 1000$  елементів для реєстрації зображення дорівнює  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ .

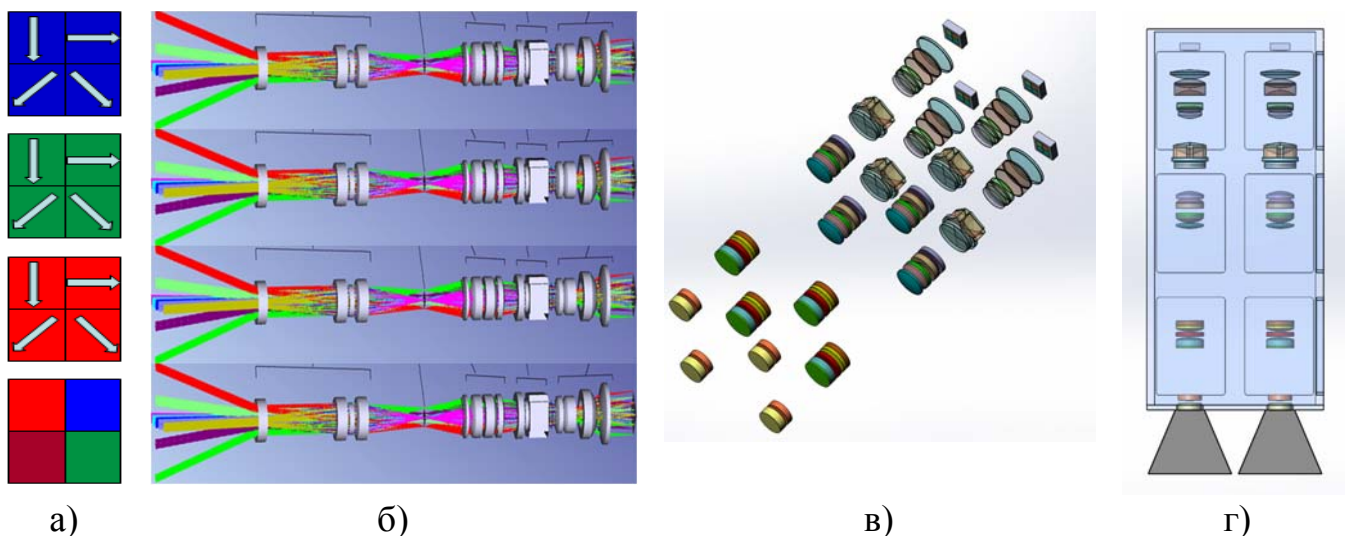


Рисунок 5 – Концепція та макет мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП: (а) поля зору каналів поляриметра МСЗП, (б) хід променів світла у каналах, (в) оптична схема поляриметра МСЗП та (г) його конструкція.

Очікується що запропонована концепція мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП разом з точністю скануючого поляриметра складуть синергію властивостей проекту Аерозоль-UA, які нададуть можливість конкурувати з іншими аерозольними місіями.

#### 4. Обробка даних поляриметра СканПол та поляриметра МСЗП

Згідно з технічним завданням Договору також були проведені роботи з розробки процедури обробки даних поляриметра СканПол та мультиспектрального мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП. Відомо, що вимірювання інтенсивності і ступеня лінійної поляризації розсіяного атмосферою і поверхнею Землі сонячного випромінювання з багатьох напрямів дозволяють визначити фазову функцію та поляризаційні характеристики розсіювання аерозольними частинками, оцінити їх розміри, а також визначити АОТ.

В Університеті Ліль 1, Франція, розробляється алгоритм GRASP (Generalized Retrieval of Aerosol & Surface Properties) для відтворення параметрів аерозолі, за

допомогою якого можна отримувати інформацію про частинки усіх розмірів. На відміну від багатьох підходів GRASP не використовує “довідкові таблиці” (Look-Up-Table, LUT), а реалізує всі розрахунки переносу випромінювання шляхом підбору параметрів аерозолу серед усіх можливих. За допомогою цього алгоритму можна отримувати розширений набір параметрів аерозолу, таких як розподіл частинок за розміром, комплексний показник заломлення, а також деяких параметрів, що характеризують форму частинок та вертикальний розподіл.

Складність і змінність системи атмосфера-поверхня є основним джерелом похибок при отриманні параметрів аерозолу за супутниковими даними. Планується, що за допомогою поляриметра СканПол буде вимірюватися спектральна інтенсивність та ступінь поляризації відбитого від системи атмосфера-поверхня випромінювання з близько 200 напрямків над кожним пікселем. Для відтворення характеристик аерозолу спостереження проводитимуться в спектральних каналах, де ефекти поглинання атмосферними газами є мінімальними: 370, 410, 555, 865, 1378, 1610 нм [1]. Таким чином, для кожного пікселя на земній поверхні буде отримано ~2400 (СканПол) і ~126–490 (залежить від швидкості передачі даних з мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП) “незалежних” спостережень протягом проходження супутника по одній орбіті. Алгоритм GRASP використовує розширений набір параметрів, які описують вимірювані інтенсивності випромінювання [2, 3]. Такий підхід забезпечує одночасне відтворення оптичних властивостей аерозолу та підстилаючої поверхні зі спостережень над сушею.

Для моделювання параметрів аерозолу, отриманих з супутникових спостережень Аерозоль-UA, були використані спостереження супутникового приладу POLDER/PARASOL. Використовуючи алгоритм GRASP, відтворені параметри аерозолу зі спостережень POLDER/PARASOL, взяті у якості модельних параметрів. Так, наприклад, для 14 серпня 2010 року використані такі параметри разом із геометрією спостережень Аерозоль-UA. Була розв’язана пряма задача по переносу випромінювання в атмосфері над Києвом та отримані параметри, котрі за цих умов могли бути отримані супутниковою місією Аерозоль-UA. Ці параметри включають величини I, Q, U та характеристики поверхні для кожного спектрального каналу та кута спостереження площадки на поверхні. Маючи модельні параметри спостереження, була розв’язана зворотна задача та отримані характеристики аерозолу для 14 серпня 2010 року над Києвом. Порівняння отриманих характеристик аерозолу, отриманих за допомогою сонячного фотометра мережі AERONET, розташованого на даху ГАО НАНУ, поляриметра POLDER/PARASOL та модельних спостережень Аерозоль-UA, представлені на рисунку 6. Моделювання було виконано як для об’єднаних спостережень СканПол та МСЗП (англійською: MultiSpectral Imager-Polarimeter MSIP), так і для МСЗП окремо. Моделювання параметрів, отриманих з поляриметра МСЗП, виконано для довжин хвиль 410, 555, 865 та 936 нм, у той час як для об’єднаних спостережень СканПол та МСЗП — 370, 410, 555, 865, 936, 1378 та 1610 нм.

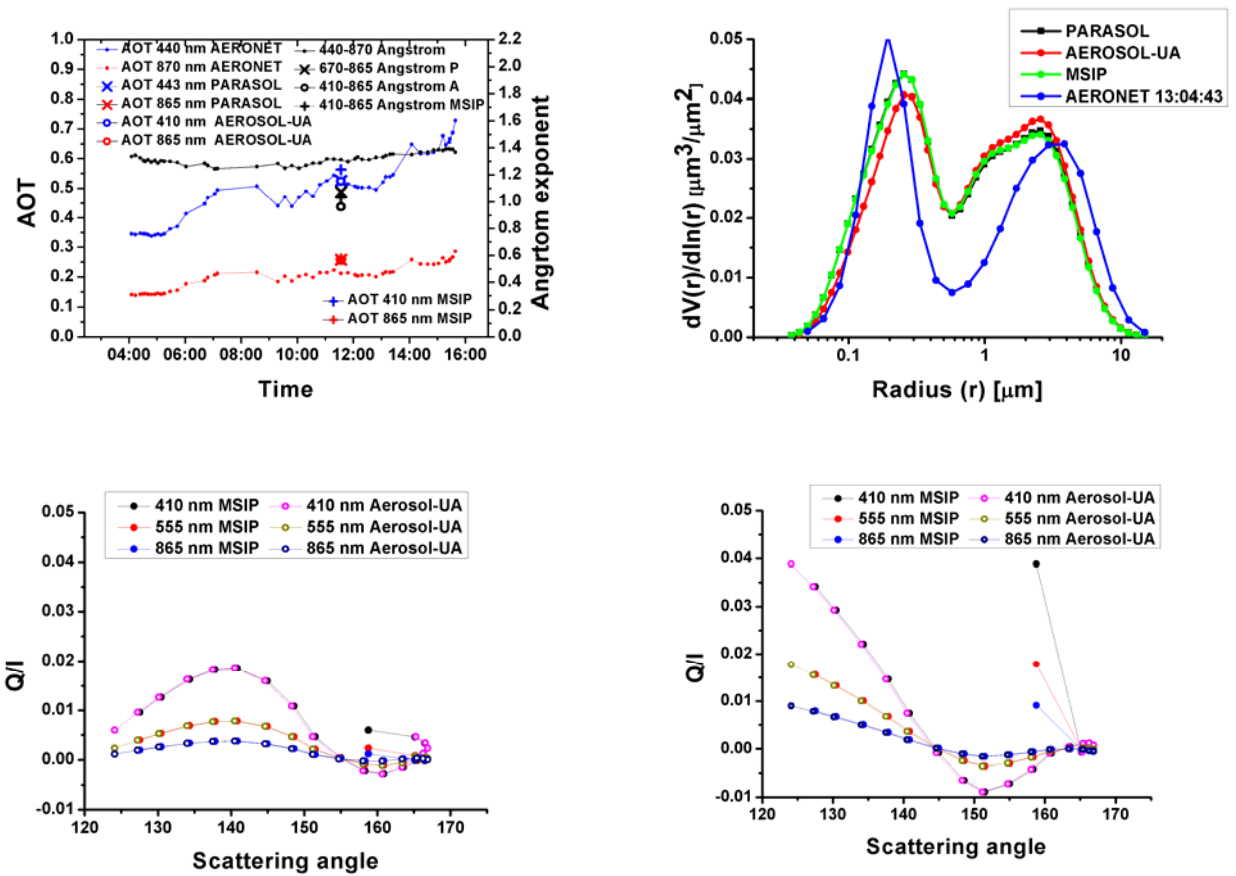


Рисунок 6 – Порівняння відтворених характеристик аерозолю з даних POLDER/PARASOL, AERONET та Аерозоль-UA: AOT, розподіл за розміром, відношення поляризаційних характеристик для СканПол та МСЗП.

Показано, що відтворені характеристики аерозолю з модельних даних Аерозоль-UA дуже добре відповідають відтвореним характеристикам з даних спостережень POLDER/PARASOL та AERONET. Різниця значень у відтворенні AOT може бути пояснена різними довжинами хвилі, що використовуються для спостереження, а саме 440 нм — AERONET, 443 нм — POLDER/PARASOL та 410 нм — Аерозоль-UA. Інтенсивність  $I$  та відношення параметрів Стокса  $Q/I$ ,  $U/I$  відтворюються з дуже високою точністю, використовуючи декілька ітерацій, що свідчить про точність відтворення параметрів з використанням алгоритму GRASP. Цей аналіз показав, що кількість “незалежних” спостережень як поляриметром МСЗП, так і об’єднаних спостережень СканПол і МСЗП, достатня для коректного відтворення характеристик аерозолю.

Моделювання з використанням синтетичних даних буде продовжено для інших характеристик аерозолю, атмосфери та поверхні. Проте, виходячи з перших результатів, можна сказати про високу відповідність отриманих характеристик аерозолю, включаючи розподіл за розміром, комплексний показник заломлення, альbedo одноразового розсіювання, а також інших параметрів, що описують форму та вертикальний розподіл частинок. Ця інформація потрібна для виявлення



природного та антропогенного аерозолі, відносного вкладу кожного з них та оцінці енергетичного вкладу аерозолі на клімат.

## 5. Висновки

Проведено моделювання елементів та частин головного інструменту космічної місії Аерозоль–UA: оптико-механічного блоку бортового поляриметра СканПол, вузлів VIS та IR, вхідних об'єктивів та коліматорів, вузла призми Воластона, VIS та IR вузлів спектральної селекції і камерних об'єктивів, оптико–механічного блоку в цілому. Виготовлено ескізну 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. Розроблено та виготовлено спеціальний двигун для блоку скануючих дзеркал. Проведено дослідження блоку скануючих дзеркал, результати якого показали, що використана комбінація дзеркал компенсує поляризацію при відбитті від металевого покриття. Розроблено нову концепцію та схему мультиспектрального зображуючого поляриметра МСЗП. Продовжено доопрацювання методики роботи мобільної станції валідації та калібрування поляризаційних вимірювань аерозолі для наземної підтримки космічного експерименту. Розроблено основні методи алгоритму з відновлення параметрів аерозолі на основі програмного забезпечення GRASP, розроблено структуру Центру збору та обробки даних проекту Аерозоль-UA.

## Перелік посилань

1. Milinevsky, G., Ya. Yatskiv, O. Degtyaryov, I. Syniavskiy, Yu. Ivanov, A. Bovchaliuk, M. Mishchenko, V. Danylevsky, M. Sosonkin, V. Bovchaliuk. 2015. Remote sensing of aerosol in the terrestrial atmosphere from space: new missions. *Advances in astronomy and space physics* 5: 11-16. ISSN 2227-1481.
2. Dubovik O., M. Herman, A. Holdak, T. Lapyonok, D. Tanré, J.L. Deuzé, F. Ducos, A. Sinyuk, A. Lopatin, Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations, *Atmos. Meas. Tech.* 4 (2011) 975–1018, doi:10.5194/amt-4-975-2011.
3. Dubovik O., T. Lapyonok, P. Litvinov, M. Herman, D. Fuertes, F. Ducos, A. Lopatin, A. Chaikovsky, B. Torres, Y. Derimian, X. Huang, M. Aspetsberger, C. Federspiel, GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere, *SPIE: Newsroom* (2014) doi:10.1117/2.1201408.005558.

Науковий керівник договору

Зав. лаб. оптики атмосфери ГАО НАН України

д.ф.-м.н.

Г. Міліневський

+38(050)3525498

genmilinevsky@gmail.com