

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.072>

УДК 551.510.42

**І. І. Синявський¹, В. О. Данилевський^{1,2}, Є. А. Оберемок^{1,2},
Ю. С. Іванов¹, Р. С. Осипенко^{1,2}, М. Г. Сосонкін¹,
Г. П. Міліневський^{1,2,3}, І. В. Фесянов²**

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 60, Київ, Україна, 01033

³Коледж фізики, Міжнародний центр науки майбутнього, Цзілінський університет
вул. Цяньцзінь 2699, Чанчунь, Китай, 130012
e-mail: genmilinevsky@gmail.com

Радіометричне калібрування на орбіті сканувального поляриметра проєкту «Аерозоль-УА»: методика, елементи конструкції, кути освітлення

Розглянуто ідеологію побудови пристрою радіометричного калібрування за Сонцем фотометрів/поляриметрів на навколоземній орбіті, а також проаналізовано недоліки та переваги елементів, що є основою цього пристрою, та матеріалів, з яких ці елементи зазвичай виготовляються. Визначено умови освітлення робочого елемента вузла радіометричного калібрування сканувального поляриметра «СканПол» при різних можливих конфігураціях його будови, на різних ділянках орбіти під час руху у складі супутникової платформи «ЮжСат». Вказано, на яких ділянках орбіти супутника умови освітлення Сонцем робочого елемента пристрою є оптимальними з точки зору співвідношення кутів падіння/спостереження та мінімізації світлової компоненти, зумовленої відбиттям поверхнею Землі, атмосферою, елементами конструкції «СканПол» і супутникової платформи. Отримані результати будуть використані для розробки оптимальної конструкції вузла радіометричного калібрування «СканПол» та дозвольть забезпечити необхідну радіометричну точність отримуваних даних і їхню стабільність протягом космічної місії «Аерозоль-УА».
Ключові слова: аерозоль, атмосфера, поляриметр, радіометричне калібрування, супутникова платформа.

ВСТУП

Космічний проєкт «Аерозоль-UA» для досліджень аерозолів у земній атмосфері з борту космічного апарата заплановано реалізувати з використанням супутникової платформи «ЮжСат» [11, 45], на якій будуть встановлені два спектрополяриметри: мультиспектральний сканувальний поляриметр «СканПол» та мультиспектральний іміджер-поляриметр (МСІП). Мета, призначення, склад та характеристики спектрополяриметрів проєкту «Аерозоль-UA» з визначення мікрофізичних характеристик аерозолів у атмосфері детально викладено у публікаціях [9, 21, 32, 33, 45]. Космічна місія «Аерозоль-UA» планується для запуску на приполярну сонячно-синхронну орбіту висотою приблизно 700 км, нахилом 98° та з місцевим сонячним часом проходження висхідного вузла на земному екваторі приблизно о 22 год 30 хв. Це орбіта, на якій досі працює прилад MODIS на супутнику «Терра» [28, 48]. Високоточне вимірювання поляриметрами «СканПол» та МСІП інтенсивності та поляризаційних характеристик випромінювання, розсіяного земною атмосферою і поверхнею, зі значним просторовим покриттям, має бути забезпечене їхнім прецизійним калібруванням, зокрема на орбіті. З метою побудови ефективної процедури калібрування було розроблено поляриметричну модель приладів «СканПол» та МСІП [32], що враховує основні джерела похибок вимірювань: зсуви рівня «нуля» електроніки та зміни чутливості фотодетекторів, різницю у пропусканні та оптичній анізотропії оптичних елементів у суміжних каналах поляриметрів. Основні принципи реалізації процедур поляризаційного калібрування викладені в [32, 45]. Проведені числові експерименти підтвердили ефективність запропонованих процедур поляризаційного калібрування, які дозволяють мінімізувати помилки визначення ступеня лінійної поляризації (DOLP) зі «СканПол» до 0.15 % та азимута площини лінійної поляризації (AOLP) — до 0.2° . Помилки визначення параметрів поляризації з МСІП мають бути меншими від 1 %, а похибки вимірювань інтенсивності (першого параметра Стокса) світла, розсіяного земною поверхнею і атмосферою, очікуються не більшими за 5 % [32].

Є багато факторів, що можуть змінити характеристики супутникових приладів, під час виведення їх на орбіту та під час польоту. Бортові інструменти при виведенні їх на орбіту піддаються сильним механічним навантаженням, зокрема перепадам тиску, ударам і вібраціям у широкому спектрі частот [12, 39]. У космічному польоті при переході з підсонячної частини орбіти у земну тінь і навпаки через значні температурні градієнти у конструкції космічного апарата виникають великі механічні напруження, що можуть викликати деформації. Вакуумне середовище сприяє забрудненню поверхонь, зокрема оптичних деталей, за рахунок дегазації елементів конструкції космічного апарата. Опромінення короткохвильовим електромагнітним випромінюванням, космічними променями та бомбардування мікрометео-

ритами також впливають на характеристики супутникових приладів [14, 41]. Калібрування супутникових приладів у польоті необхідне головним чином для виявлення і компенсації змін їхніх характеристик після виведення супутника на орбіту та протягом терміну роботи.

Для польотного калібрування оптичних інструментів дистанційного дослідження Землі конструюються спеціальні пристрої, у яких як джерело світла зазвичай використовується Сонце, а іноді й Місяць [16, 23, 51, 52, 56, 58]. Зокрема у спектро радіометрах MODIS, VIIRS, мультикутовому спектро радіометрі MISR [19, 56, 57] для радіометричного калібрування як еталонне джерело випромінювання використовують Сонце. Поляриметр APS місії «Глорія», який є прототипом сканувального поляриметра «СканПол», також містив вузол для радіометричного калібрування приладу на орбіті за Сонцем — сонячний дифузор (Solar Reference Assembly) [36, 37].

При конструюванні відповідних калібрувальних пристроїв доводиться враховувати умови освітлення елементів конструкції космічних апаратів Сонцем. Дані умови визначаються як параметрами орбіти космічного апарата, оскільки від них залежить видимий рух Сонця відносно апарата та конфігурація супутника, так і конструкцією та параметрами самого інструмента. Головним елементом калібрувальних пристроїв, як правило, є розсіювач сонячного світла, параметри якого близькі до ламбертівських. За його допомогою забезпечується освітлення вхідної апертури інструментів, а спостережувана ними поверхня розсіювача покриває усе поле зору інструмента. Зокрема, в інструментах, зазначених у цитованих вище публікаціях, використовуються розсіювальні екрани із ретельно дослідженими розсіювальними та спектральними характеристиками.

Метою даної роботи є аналіз методів радіометричного калібрування за Сонцем фотометрів/поляриметрів на навколосемній орбіті, розгляд оптичних матеріалів та умов освітлення космічного апарата на орбіті та визначення оптимальної конструкції калібрувального пристрою з огляду на особливості будови поляриметра «СканПол» на супутниковій платформі «ЮжСат» та на параметри орбіти.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЛАДУ «СКАНПОЛ» НА ПЛАТФОРМІ «ЮЖСАТ»

Космічний проєкт «Аерозоль-УА» заплановано реалізувати з використанням супутникової платформи «ЮжСат», на якій як корисне навантаження будуть встановлені наукові прилади «СканПол» та МСІП [11, 33, 45]. Блок поляриметра «СканПол» та модулі МСІП змонтовані у єдиному корпусі [9, 10, 45], який розроблено для з'єднання з супутниковою платформою «ЮжСат» так, як це показано на рис. 1. На рис. 1 також вказано загальні габаритні розміри корпусу з приладами «СканПол» та МСІП та супутникової платформи, сонячні батареї якої перебувають у робочому розгорнутому стані.

Сканувальний поляриметр «СканПол» проєкту «Аерозоль-УА» базується на концепції космічної місії NASA «Глорія», метою якої був моніторинг просторового і часового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів у атмосфері Землі за допомогою поляриметра APS [16]. Орбітальний сканувальний поляриметр «СканПол» призначено для вимірювання з високою поляриметричною точністю 0.15 % параметрів Стокса I , Q , U у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової (УФ) до короткохвильової інфрачервоної (ІЧ) області в широкому діапазоні фазових кутів.

Основними складовими частинами «СканПол» є: блок сканування, мультиспектральний поляризаційний аналізатор, вузли калібрування та блок базової електроніки. Блок сканування містить блок дзеркал, закріплених на валу безінерційного електричного приводу, і дозволяє проводити сканування підстильної поверхні Землі [47]. Поляризаційний аналізатор дозволяє визначити параметри Стокса I , Q та U випромінювання у спектральному діапазоні 370...1620 нм [46].

На рис. 2 представлено 3D-модель компонування основних вузлів приладів МСП, «СканПол» та пристроїв калібрування, для зручності не показано частину елементів загального корпусу та електричний привід блоку сканування.

Для контролю та підтримання високої точності вимірювань на орбіті, до складу «СканПол» включено чотири калібрувальні вузли:

- 1) вузол з призмами Глана, що формують лінійно поляризоване випромінювання з відомим азимутом поляризації для калібрування деполіризаційних коефіцієнтів оптичної системи;
- 2) вузол з деполіризаторами на основі клинів з анізотропного кварцу, що формують неполяризоване випромінювання для калібрування коефіцієнтів ізотропного пропускання оптичної системи;
- 3) вузол темного сигналу (циліндр зі спеціальним чорним покриттям внутрішніх стінок, аналог «чорного тіла») для калібрування нульового рівня сигналу поляриметра;
- 4) вузол з розсіювальним дифузором для радіометричного калібрування оптичної системи за розсіяним сонячним випромінюванням.

Калібрувальні вузли розташовані таким чином, щоб процедуру калібрування «СканПол» можна було провадити на кожному оберті блоку сканування. Перші три з описаних вузлів аналогічні тим, які використовувались у поляриметрі APS місії «Глорія» [16, 36, 37], тому в даній роботі докладно розглядатись не будуть. Через особливості конфігурації приладів та супутника «ЮжСат» пристрій для радіометричного калібрування «СканПол» відрізняється своєю конструкцією від того, що використовувався в APS.

Основні етапи циклу сканування «СканПол» за рахунок обертання блоку сканувальних дзеркал схематично показано на рис. 3 [45].

Під час обертання дводзеркальна система сканувального блоку спрямовує випромінювання з відповідних напрямків спостереження у мультиспектральний поляризаційний аналізатор (рис. 2 та 3).

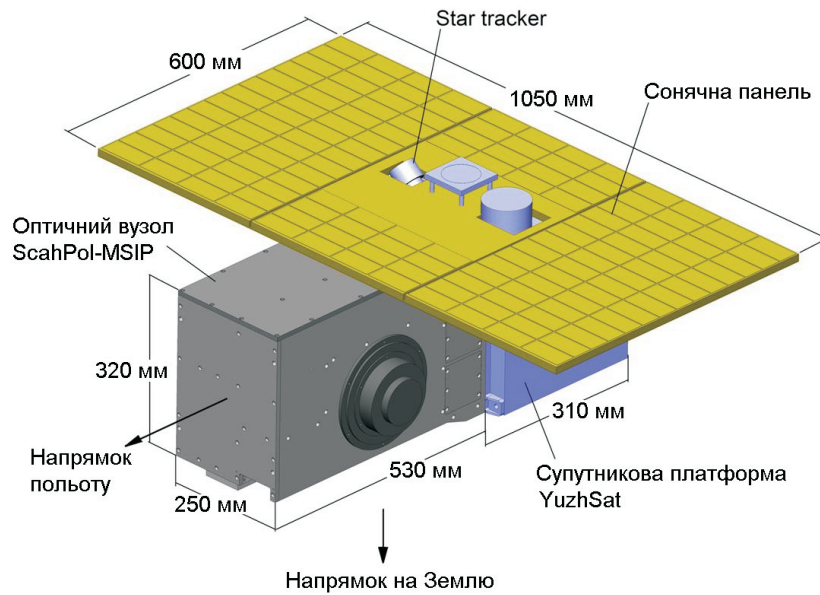


Рис. 1. Конфігурація супутника проєкту «Аерозоль-UA» на платформі «ЮжСат» з поляриметрами «СканПол» та МСІП



Рис. 2. Геометричне розташування вузлів калібрування «СканПол» та вхідного отвору для калібрування по сонячному випромінюванню, червоними лініями позначено промені, що спрямовуються для калібрування на вхід блоку сканувальних дзеркал

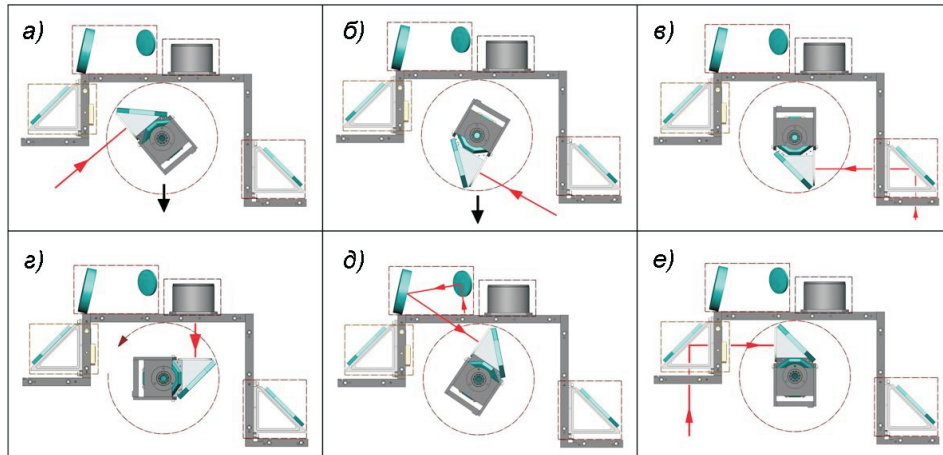


Рис. 3. Один цикл сканування дзеркал: *a, б* — положення дзеркал на початку (кут спостереження $+50^\circ$), та в кінці (кут спостереження -60°) поточного циклу вимірювань, відповідно; *в* — калібрування деполаризованим світлом; *г* — калібрування темного сигналу за «чорним тілом»; *д* — радіометричне калібрування за сонячним світлом; *е* — калібрування поляризованим світлом. Червона лінія зі стрілкою означає напрямок вхідного світла, чорна стрілка — напрямком у надир. Рисунок адаптовано з роботи [45]

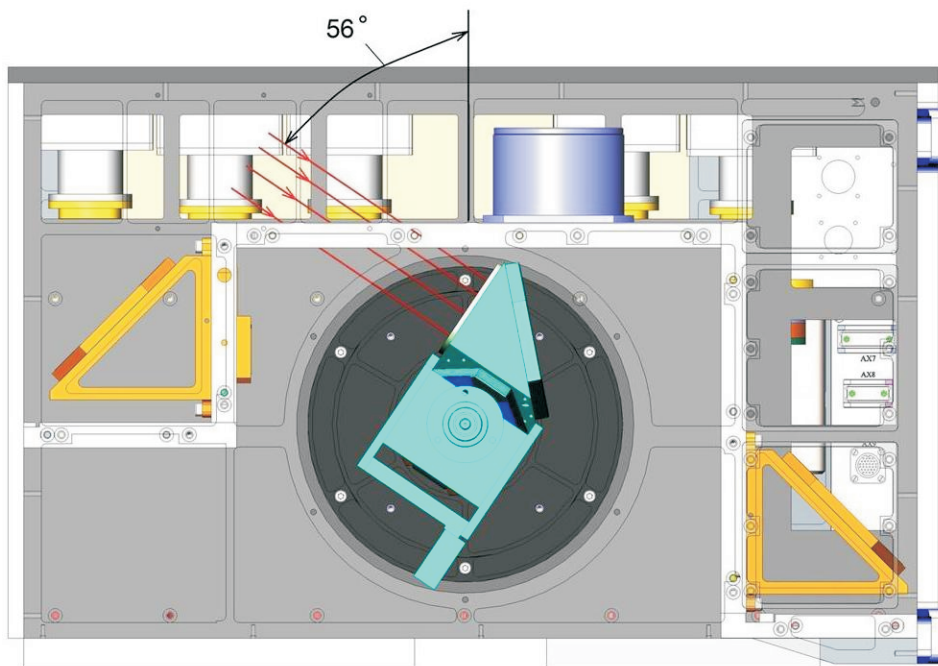


Рис. 4. Схематичне зображення світлового пучка, спрямованого на вхідну апертуру блоку сканування «СканПол». Кут між віссю світлового пучка і напрямком у зеніт становить 56°

В одному з положень блоку сканування (рис. 3 та 4) на його дзеркальну систему має потрапляти сонячне випромінювання, розсіяне у вузлі радіометричного калібрування.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ПОЛЯРИМЕТРІВ НА ОРБІТІ

Загальний спрощений вираз для інтенсивності випромінювання у поляризаційному каналі «СканПол» з азимутаналізатора (призми Волластона) після компенсації зміщення рівня нуля сигналу у каналі має вигляд

$$I = A_r RD, \quad (1)$$

де RD — цифрове значення з виходу аналого-цифрового перетворювача відповідного каналу «СканПол», компенсоване за зміщення нуля сигналу в каналі, виміряне в умовах, коли сканувальна система «СканПол» «дивиться» на вузол еталонного темного випромінювання; A_r — радіометричний коефіцієнт, що дозволяє перерахувати цифрове значення з АЦП у значення інтенсивності, нормалізоване на інтенсивність падаючого сонячного випромінювання. Даний коефіцієнт не впливає на поляризаційні вимірювання, де у розрахунках фігурують відношення інтенсивностей у каналах [32], проте необхідний для того, щоб «СканПол» працював як радіометр/фотометр.

При радіометричному калібруванні випромінювання від еталонного джерела світла, у нашому випадку Сонця, має потрапляти на розсіювач вузла калібрування під відомими кутами. В результаті оптика вузла на вході одного з поляризаційних каналів «СканПол» з розсіяного сонячного випромінювання має формувати детерміновану за інтенсивністю інтегральну картину. Тоді радіометричний коефіцієнт A_r можна буде визначити як відношення відомого значення I^o інтенсивності на вході каналу до отриманого цифрового значення на виході АЦП RD^o :

$$A_r = I^o / RD^o. \quad (2)$$

У APS вузол SRA (Solar Reference Assembly) для радіометричного калібрування містив пластину дифузора «Spectralon» — добре охарактеризований еталонний розсіювач з ламбертівською індикатрисою. Двонаправлена функція розподілу коефіцієнта відбиття ($BRDF$) і пласкість поверхні дифузора були точно визначені на землі, так що кутова залежність відбивальної здатності дифузора не призводила до проблем з радіометричним калібруванням на орбіті при зміні кута падіння сонячного випромінювання на дифузор [16]. Проте спектральні властивості «Spectralon» погіршуються під впливом ультрафіолету, тому як еталонний розсіювач даний тип дифузора фактично можна було використати лише протягом короткого терміну часу, і лише один раз [36].

У сканувальному поляриметрі POSP (Particulate Observing Scanning Polarimeter) [31, 59], прототипом якого також було обрано APS, проблему деградації дифузора SD (solar diffusor) частково вирішили введенням монітора стабільності сонячного дифузора SDSM (Solar Diffuser Stability Monitor). У час, спеціально обраний для радіометричного калібрування, коли сонячне випромінювання потрапляло під потрібним кутом на дифузор SD, у два канали контрольного модуля SDSM одночасно потрапляло випромінювання, відбите дифузором, та пряме сонячне випромінювання. Фіксуючи зміну різниці сигналів у цих двох каналах, можна коригувати деградацію SD [59].

АНАЛІЗ ВИМОГ ДО КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА РАДИОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ

При розробці вузла радіометричного калібрування для «СканПол» ми виходили з таких міркувань.

1. Вузол повинен створювати рівномірне освітлення у полі зору кожного із оптичних блоків поляризаційного аналізатора «СканПол». Дану вимогу можна забезпечити використанням розсіювача з характеристиками, близькими до ламбертівського, у спектральному діапазоні 0.35...1.7 мкм. При цьому переріз світлового пучка від розсіювача повинен перекривати одночасно вхідні апертури усіх чотирьох телескопів, а його відбивна поверхня — повністю перекривати поле зору приладу.

2. Для калібрування можна використати випромінювання дифузного розсіяне як у зворотному (режим відбиття), так і у прямому напрямку (режим пропускання).

3. Вузол має містити мінімальну кількість оптичних елементів, що будуть зазнавати деградації під час роботи в космічному просторі під прямим сонячним опроміненням.

4. Розсіювач повинен бути встановлений так, щоб забезпечувалося пряме освітлення Сонцем його робочої поверхні у встановленому діапазоні кутів падіння світлового пучка. Імовірність потрапляння на розсіювач світла, відбитого елементами конструкції приладу, а також поверхнею та атмосферою Землі, має бути мінімізована.

5. Світловий потік від розсіювача повинен надходити до першого дзеркала сканувальної системи «СканПол» безпосередньо, без додаткових оптичних деталей (поворотних дзеркал, призм і т. п.). Для обмеження перерізу пучка у межах потрібного кута на шляху від розсіювача до дзеркала необхідно використовувати систему діафрагм.

Щоб розсіювач працював на відбивання, кут між перпендикуляром до поверхні розсіювача та напрямком на Сонце має бути істотно меншим від 90° навіть у припущенні того, що він має ламбертівські характеристики. Робоча поверхня розсіювача повинна бути захищена від світла, розсіяного земною поверхнею і атмосферою та світла, відбитого від поверхонь і деталей конструкції супутника. Це накладає

обмеження на орієнтацію супутникової платформи відносно Сонця, при якій можна виконувати процедуру калібрування.

З огляду на висловлені міркування, особливості будови і розміщення приладів «СканПол» та МСІП на платформі «ЮжСат» та параметри орбіти, були сформульовані основні вимоги до розташування та конструкції вузла калібрування. Умови на розташування, і орієнтація розсіювача відносно корпусу приладу у випадку «СканПол» визначаються умовами освітлення супутника Сонцем та відбитим від земної поверхні світлом. Так, з орбіти висотою 705 км лінія горизонту буде спостерігатися під кутом приблизно 113.5° відносно зеніту, тобто під кутом 23.5° від горизонтальної площини у бік надира (тут за лінію горизонту прийнято поверхню на висоті приблизно 100 км від поверхні земного сфероїда). Це означає, що відбите від земної поверхні світло буде надходити до розсіювача з конуса з кутовим розходженням 66.5° відносно надира, і робоча поверхня розсіювача повинна бути захищеною від нього.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОРОЗСІЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛА КАЛІБРУВАННЯ

Необхідний кутовий розподіл розсіяного випромінювання та спектральний діапазон, у якому має працювати розсіювач вузла радіометричного калібрування, накладають певні обмеження як на геометричні параметри розсіювача, так і на вибір матеріалу для його виготовлення, зокрема при роботі у режимі відбиття або пропускання.

Для виготовлення розсіювачів з широким робочим діапазоном оптичного спектру, що працюють на дифузне відбивання світла, зокрема стандартів білизни, у лабораторіях різних країн використовуються екрани з оксиду магнію (MgO), сірчаноокислого барію ($BaSO_4$), з флюорополімеру, а також пластини з молочного скла і спеціальної оптичної кераміки. Ці розсіювачі ефективно відбивають світло у широкому спектральному діапазоні, межі якого визначаються хімічним складом матеріалу та структурою розсіювача. У нашому випадку важливою є крутизна спадання їхньої відбивної здатності поблизу короткохвильової межі, біля $\lambda = 300$ нм, та на ближній інфрачервоній ділянці у діапазоні $\lambda = 0.9 \dots 1.7$ мкм. Так, найширший спектральний діапазон мають давно використовувані у лабораторній практиці розсіювачі з MgO , $BaSO_4$ та флюорополімеру [29, 40]. Короткохвильова межа відбивної здатності цих матеріалів лежить у ділянці, значно коротшій від $\lambda = 300$ нм, хоча крутизна її спадання тут залежить від структури матеріалу та способу нанесення його на основу екрана. Довгохвильова межа лежить значно далі за $\lambda = 2$ мкм, але має місце зменшення відбивної здатності на кілька відсотків на ділянці спектру приблизно $1.5 \dots 1.6$ мкм. Відбивні розсіювачі з молочного скла використовуються головним чином як стандарти білизни у візуальній ділянці спектру

(400...750 нм), де їхні спектральні характеристики добре відомі [4, 8, 53]. Проте, як це показано у цитованих публікаціях, зразки молочного скла типу МС20 і ОНС1...ОНС4, які, зокрема, виготовляються в Україні (ДП Ізюмський приладобудівний завод, <http://ipz.com.ua/>), а також зразки молочного скла типу 2015 і 2016 виробництва США, мають відносно високу відбивну здатність на обох межах зазначеної візуальної ділянки спектру. У роботі [22] наведено спектральну характеристику дифузного відбивання зразка молочного скла МС20 у діапазоні 0.3...2.4 мкм. При довжинах світлової хвилі 0.35 мкм та 2.0 мкм коефіцієнт відбивання цього зразка становить приблизно 0.80. Хоча спектральні характеристики дифузного відбивання молочного скла МС20 можуть дещо змінюватись від зразка до зразка, однак даний матеріал можна розглядати як перспективний для використання у вузлі радіометричного калібрування приладів космічного проєкту «Аерозоль-УА». Також зазначеному робочому спектральному діапазону приладу «СканПол» відповідають і деякі види оптичної кераміки з дифузним відбиванням, наприклад оптична кераміка типу SOO-U6 [22] або Accuflect B6 [38]. Оптична кераміка, або Irtran — це матеріали типу скла, що виготовляються з полікристалічної маси різних речовин (наприклад фториду магнію MgF_2 , оксиду магнію MgO , сульфиду цинку ZnS , фториду кальцію CaF_2 та деяких інших) методом гарячого пресування при температурі приблизно $2/3$ від температури плавлення відповідної речовини у вакуумі [54]. З цих матеріалів виготовляються різноманітні оптичні прилади, зокрема і світлорозсіювальні екрани, головним чином для інфрачервоної ділянки спектру, що використовуються в умовах високих механічних та термічних навантажень.

Кутові характеристики дифузного відбивання зазначених матеріалів також досліджувались детально [4, 8, 18, 22, 38]. Кутовий розподіл світла, дифузно відбитого розсіювачами, покритими оксидом магнію та сірчаноокислим бар'єром, залежить від способу нанесення цього покриття на основу, але загалом він ближчий до ламбертівського, ніж розподіл світла, розсіяного розсіювачем з молочного скла та з кераміки. Процедуру вимірювань кутових характеристик зразків розсіювачів з MgO і $BaSO_4$, виготовлених за різними технологіями, а також зразків молочного скла МС20 і МС14, детально викладено у роботі [18]. Тут наведено також і поляризаційні властивості цих розсіювачів. Використана у роботі [18] гоніофотометрична процедура вимірювань кутових характеристик розсіювальної здатності дифузних екранів, при якій змінюється кут падіння світла на розсіювач у широкому діапазоні (від 4 до 84°) при сталому куті спостереження, відповідає умовам освітлення розсіювача на орбіті супутника, де змінюватиметься саме кут падіння світла при незмінному куті спостереження, якщо у конструкції розсіювача не буде передбачено механізму повороту. Удосконалену гоніометричну процедуру використано також при дослідженнях характеристик кераміки Accuflect. У більшості процедур

вимірювань кутових характеристик, як правило, змінюється кут спостереження при сталому куті освітлення, для прикладу див. дані у роботах [4, 8, 22]. Результати досліджень також показують певні недоліки відбивних розсіювачів, зокрема наявність дзеркальної складової у потоці розсіяного світла, особливо у зразках молочного скла з полірованими поверхнями, частка якої у відбитому світловому потоці може становити кілька відсотків. Це може обмежувати діапазон зміни кута освітлення розсіювачів при їхньому застосуванні у робочих умовах. Наведені в роботах [4, 8, 22] кутові характеристики розсіяння зразків скла типу МС20 і ОНС1–4 також свідчать, що хоча коефіцієнти яскравості цих зразків практично рівномірні у широкому діапазоні кутів освітлення (спостереження), однак при кутах спостереження (чи освітлення) 50 ...60 вони вже доволі різко змінюються.

Для калібрування приладів дистанційного дослідження земної атмосфери й поверхні з орбіти вже протягом більш як 20 років використовуються розсіювальні екрани (сонячні дифузори) «Spectralon» [43]. Ці дифузори (розсіювачі) виготовляються з флюорополімеру (політетрафлюоретилен), спектральні та розсіювальні характеристики якого добре досліджені [27]. «Spectralon» має рівномірну відбивну здатність у спектральному діапазоні приблизно від 0.25 до 2.5 мкм, а кутові характеристики розсіювання приблизно такі ж, як і у інших розглянутих тут розсіювачів. У згаданому спектральному діапазоні при зміні кута падіння у межах 50 ...60, залежно від коефіцієнта відбивання (альbedo), відбивна здатність «Spectralon» є близькою до ламбертівської. Як і у інших розсіювачів, у індикатрисі розсіювання «Spectralon» проявляється і дзеркальна складова, що супроводжується деяким ступенем поляризації розсіяного світла, особливо при великих кутах падіння. Отже, при використанні такого розсіювача необхідні ретельні вимірювання кутових характеристик робочих зразків. Як вже зазначалося раніше, в умовах космосу відбувається деградація відбивної здатності розсіювачів з флюорополімеру, особливо протягом перших кількох місяців, по-різному у різних спектральних каналах [56, 57]. Тим не менш розсіювальні екрани з цього матеріалу використовуються як цілком придатний робочий засіб для калібрування на орбіті багатьох супутникових приладів дистанційних досліджень Землі, наприклад MODIS та VIIRS [56], MISR [17], POSP [59], OMI [20] та інші. «Spectralon» був встановлений і на приладі APS супутника «Глорія» [16, 37]. Для оцінювання і врахування деградації таких розсіювачів використовуються різні допоміжні пристрої [20, 52, 57] і спеціальні маневри космічних апаратів з націлювання на Місяць [37, 52, 57].

Для радіометричного калібрування можливе використання розсіювачів, що пропускають сонячне випромінювання. Прозорі розсіювачі виготовляються на основі молочного або матового скла і відомі приклади їхнього застосування у метеорологічних засобах, наприклад еталонах енергетичної яскравості і спектральної щільності [5—7]. Зо-

крема, у зазначеному еталоні яскравості в діапазоні спектру 0.3... 2.6 мкм використовується розсіювач з молочного скла МС23. Для оцінки придатності розсіювачів даного типу до використання у модулі радіометричного калібрування «СканПол» доцільно виконати детальні дослідження їхніх спектральних та розсіювальних характеристик. Згідно з даними про кутові характеристики коефіцієнтів яскравості, наприклад зразків молочного скла МС12 і МС23 товщиною біля 3 мм, наведеними у роботі [8] для кута падіння 0° , при кутах падіння приблизно до 15° і кутах спостереження приблизно до 40° індикатриса яскравості змінюється повільно, що є сприятливим для випадку «СканПол». Однак розсіювальна здатність молочного скла тим ближча до ламбертівської, що більшою є товщина зразка, а із збільшенням товщини зменшується його прозорість, що може накласти певні обмеження на можливість застосування таких розсіювачів у нашому випадку.

Крім молочного скла, у еталоні енергетичної яскравості і спектральної щільності [5—7] як розсіювач використовується матове кварцове скло типу КУ1. Оскільки воно має широкий спектральний діапазон прозорості і є одним з найстійкіших до радіаційного опромінення, воно широко використовується у космічному приладобудуванні [4]. Тому вивчення його розсіювальних характеристик та можливості виготовлення на його основі розсіювача для вузла радіометричного калібрування також є доцільним.

Незважаючи на недоліки розсіювачів на основі політетрафлуороетилену (матеріалу, з якого виготовляються «Spectralon»), про які згадувалося вище, вони досить широко використовуються у вузлах для радіометричного калібрування супутникових приладів по Сонцю, зокрема у режимі пропускання [25]. Тому варто також оцінити можливість використання розсіювача типу «Spectralon» у режимі пропускання для радіометричного калібрування «СканПол».

Для детального опрацювання конструкції вузла радіометричного калібрування «СканПол» необхідно знати умови освітлення приладу при його переміщенні на орбіті, зміну кута падіння сонячного світла на робочу поверхню розсіювача вузла та кут, під яким пучок розсіяного світла падає на вхідне дзеркало сканувального вузла приладу «СканПол» (кут спостереження). Аналіз цих умов для декількох варіантів розсіювачів проведено у наступному розділі.

АНАЛІЗ УМОВ ОСВІТЛЕННЯ РОЗСІЮВАЧА ДЛЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА РАДИОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ «СКАНПОЛ» НА ОРБІТІ

Зміна положення Сонця відносно супутника на сонячно-синхронній приполярній орбіті. Кути падіння сонячного світла на вхідну апертуру калібрувального пристрою приладу «СканПол» при переміщенні супутника по орбіті визначаються положенням Сонця відносно супут-

ника у системі координат, головними площинами якої є площина орбіти супутника і площина, перпендикулярна до напрямку надир — зеніт (далі — горизонтальна площина). Положення Сонця задається його зенітною відстанню Z_S та кутом A_S (далі — азимутальний кут Сонця) у горизонтальній площині від напрямку вектора руху супутника. Для орбіти з нахилом 98° і часом проходження висхідного вузла на екваторі приблизно 22 год 30 хв (дополуднева орбіта, на якій перебуває, наприклад, супутник «Терра»), азимутальний кут Сонця буде відраховуватись уліво, тобто на схід.

Для калібрування характеристик оптичних приладів проєкту «Аерозоль-УА» під час роботи на орбіті у складі штучного супутника Землі необхідно знати потрібні для цього параметри Сонця, зокрема його кутові координати у системі координат супутника, а саме зенітну відстань (або відстань від надира) і азимут. Ці топоцентричні горизонтальні координати Сонця необхідні для обчислень кута падіння на вхідну апертуру калібрувального вузла приладу «СканПол» [9, 32].

Видимі топоцентричні координати Сонця, які враховують його горизонтальний паралакс унаслідок руху супутника по орбіті, обчислюються для положень супутника на коловій орбіті з висотою 705 км і відповідним періодом 98.7 хв, обчисленим за третім законом Кеплера. Геоцентричні координати супутника (широта й довгота при висоті 705 км над земною поверхнею) обчислюються за формулами сферичної тригонометрії уздовж його орбіти із заданим інтервалом часу. При цьому використано параметри фігури Землі (земного еліпсоїда) згідно із системою фундаментальних астрономічних сталих 1976 р. і 1979 р. Міжнародного астрономічного союзу (МАС) [24].

Топоцентричні координати Сонця обчислюються за його геоцентричними координатами, обчисленими на основі фундаментальних ефемерид DE405/LE405 [42] на 10 год середнього сонячного часу Гринвіцького меридіана (ССЧ ГМ), що близько до моменту проходження супутником низхідного вузла його орбіти на земному екваторі (тобто на денній частині орбіти). Обчислення координат виконуються за формулами, відомими з ефемеридної астрономії та астрометрії з використанням фундаментальних астрономічних сталих МАС 1976 і 1979 рр. [1, 2, 24].

На рис. 5 показано зміни зенітної відстані Сонця над математичним горизонтом супутника залежно від його положення у своїй орбіті відносно висхідного вузла. Вони обчислені, задля визначеності, на дати 2020 р., близькі до моментів рівнодень (21 березня і 21 вересня) та сонцестоянь (21 червня і 21 грудня). На рис. 6 наведено рівні математичного та справжнього горизонту супутника для висоти 100 км. Ці дані дозволяють оцінити граничні положення Сонця (під час сонцестоянь) та середні протягом року зазначеної орбіти з моментом перетину висхідного вузла на екваторі 22 год 30 хв.

При конструюванні вузла, що забезпечує потрапляння прямого сонячного світла у оптичний тракт приладу «СканПол», потрібно

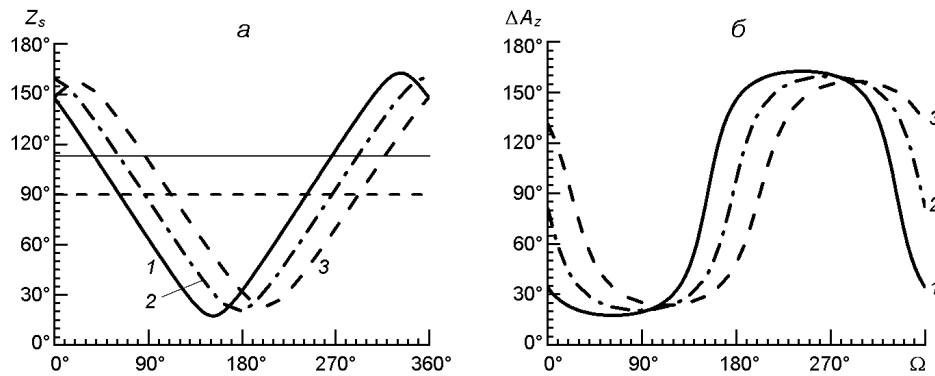


Рис. 5. Зміна зенітної відстані Сонця Z_S (а) та різниці азимутів вектора руху супутника і Сонця ΔA_z (б) під час руху супутника по коловій орбіті з нахилом 98.1° , періодом 98.7 хв і місцевим сонячним часом перетину висхідного вузла орбіти на земному екваторі 22 год 30 хв для різних сезонів 2020 року (— кутове зміщення супутника по орбіті відносно її висхідного вузла; горизонтальна штрихова лінія — математичний горизонт супутника, суцільна горизонтальна лінія — справжній горизонт. Крива 1 — 21 червня, 2 — 21 вересня; 3 — 21 грудня)

знати кут у площині математичного горизонту, під яким Сонце спостерігається з супутника (азимутальний кут Сонця). Значення цього кута обчислюються як різниця азимутів вектора руху супутника і Сонця для кожного положення супутника (при додатних значеннях азимутального кута Сонце спостерігається зліва по курсу супутника, тобто на східній частині неба). Кутом аномалії супутника тут вважається величина дуги орбіти супутника, відрахована від висхідного вузла орбіти на земному екваторі. Необхідно також врахувати, що з висоти орбіти супутника Сонце може спостерігатися над справжнім горизонтом Землі при зенітних відстанях, більших за 90° . Для сферичної Землі з середнім радіусом 6371 км і з урахуванням висоти атмосфери у 100 км (щоб уникнути її впливу) максимальна зенітна відстань (мінімальна висота), на якій буде спостерігатися Сонце над справжнім горизонтом, становить приблизно $90^\circ + 23.5^\circ = 113.5^\circ$.

На рис. 6 також показано, як змінюються зенітна відстань Сонця та його азимутальний кут при переміщенні супутника уздовж орбіти, залежно від місцевого часу перетину супутником висхідного вузла на земному екваторі та від пори року. Тут і далі азимутальний кут Сонця визначається як різниця азимута вектора руху супутника A_{Sat} та азимута Сонця A_S , тобто $A = A_{Sat} - A_S$.

У всіх випадках поблизу лінії математичного горизонту супутника висота Сонця швидко змінюється при практично незмінному азимутальному куті, тоді як при максимальних висотах Сонця дуже швидко змінюється його азимутальний кут при майже незмінній зенітній відстані. При цьому значення азимутального кута поблизу математичного горизонту, діапазон його зміни та діапазон зміни зенітної відстані Сонця істотно залежать від часу проходження супутником висхідного вузла орбіти на земному екваторі. Загалом протягом

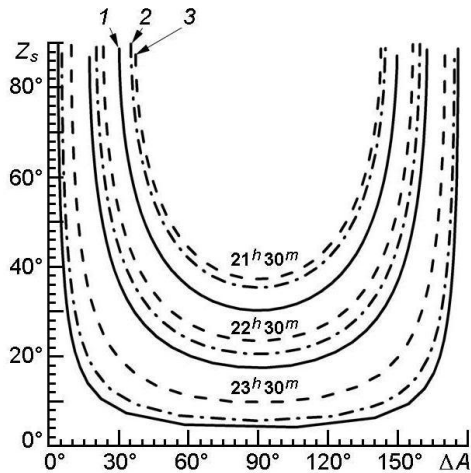


Рис. 6. Зміна зенітної відстані та азимутального кута Сонця при переміщенні супутника уздовж орбіти з нахилом 98.1 і різним місцевим сонячним часом перетину висхідного вузла на земному екваторі у різні пори року: крива 1 — 21 червня, 2 — 21 вересня, 3 — 21 грудня 2020 р.

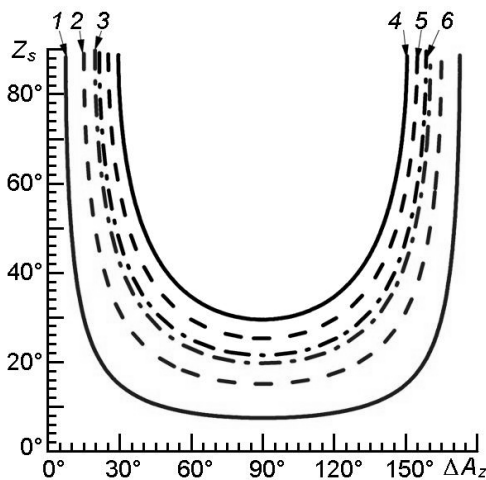


Рис. 7. Зміна зенітної відстані та азимутального кута Сонця при переміщенні супутника уздовж орбіти зі зміною її нахилу у дні сонцестояння. Нахил орбіти 21 червня 2020 р.: криві 1, 2, 3 — 118 , 103 , 93 відповідно; 21 грудня 2020 р.: 4, 5, 6 — 118 , 103 , 93 відповідно

сезону азимутальний кут Сонця поблизу математичного горизонту супутника змінюється щонайбільше у діапазоні 7 для наведених на рис. 7 моментів перетину супутником висхідного вузла. При цьому швидкість зміни зенітної відстані Сонця становить приблизно від 3 до 3.5 за хвилину залежно від сезону та часу перетину висхідного вузла орбіти. При найменших зенітних відстанях Сонця, коли його азимутальний кут близький до 90 , швидкість зміни азимутального кута істотно залежить як від пори року, так і від моменту проходження супутником висхідного вузла орбіти. Для орбіти із зазначеними тут параметрами швидкість зміни азимутального кута Сонця становить приблизно від 4.5 до 23 за хвилину залежно від пори року.

Важливим параметром орбіти супутника для конструкції вузла калібрування приладу «СканПол» по Сонцю є нахил орбіти до земного екватора. Для оцінки впливу цього параметра були зроблені обчислення зміни з часом зенітної відстані й азимутального кута Сонця для орбіти висотою 705 км з місцевим сонячним часом проходження висхідного вузла на екваторі 22 год 30 хв та кутами нахилу 93 , 98 , 103 і 118 на дати сонцестоянь та рівнодень. Головні результати

на дати сонцестоянь показано на рис. 7. При зміні нахилу такої орбіти на 25° найбільша різниця між азимутами Сонця поблизу горизонту протягом року становить приблизно 22° , причому найбільша залежність азимутального кута Сонця від нахилу орбіти буде поблизу сонцестоянь, тоді як поблизу рівнодень такої залежності практично немає. При цьому зенітна відстань Сонця поблизу горизонту змінюється зі швидкістю приблизно 3.3° за хвилину при практично незмінному азимутальному куту. При мінімальній зенітній відстані Сонця, коли його азимутальний кут близький до 90° , зенітна відстань Сонця практично незмінна, тоді як швидкість зміни азимутального кута максимальна, і у зазначеному діапазоні зміни нахилу становить приблизно від 6.5° за хвилину у день зимового сонцестояння до приблизно 24° за хвилину у день літнього сонцестояння при максимальному розглянутому тут нахилі орбіти 118° .

Отже, з наведених оцінок виходить, що зміни часу проходження вузла орбіти та її нахилу впливають на швидкість зміни зенітної відстані Сонця і його азимутального кута протягом року приблизно однаково. Але реальна орбіта може мати відхилення від запланованої у обох цих параметрах.

Оцінки кута падіння сонячного світла на вхідну апертуру калібрувального пристрою та кута спостереження. Одержані оцінки зміни зенітної відстані та азимутального кута Сонця при рухові супутника по орбіті використовуються для обчислень кута падіння пучка сонячного світла на вхідну апертуру пристрою калібрування приладу «СканПол» проекту «Аерозоль-УА».

Для вибору оптимальної конструкції пристрою та орієнтації його вхідного вікна були виконані обчислення кута падіння пучка сонячного світла з переміщенням супутника по орбіті для різних варіантів конструкції пристрою. При цьому було враховано, що напрям, з якого може надходити пучок сонячного світла від калібрувального пристрою до першого сканувального дзеркала приладу «СканПол», визначений параметрами конструкції вузла сканування. Цей напрям показано на рис. 3 і 4. Отже, логічно було б розмістити дифузний розсіювач на передній частині верхньої кришки приладу. Очевидно, що розсіювач повинен бути зорієнтований так, щоб кут падіння сонячного світла на нього був істотно меншим від 90° навіть якщо його поверхня буде розсіювати як ідеальна ламбертівська. При цьому робоча поверхня розсіювача повинна бути захищена від світла, розсіяного земною поверхнею і атмосферою та світлом, відбитим від поверхонь і деталей конструкції супутника. Тому розсіювач повинен орієнтуватися робочою поверхнею у верхню півсферу. З іншого боку, кут спостереження розсіюваного сонячного випромінювання у зазначеній системі координат визначається кутом між віссю розсіяного світлового пучка, спрямованого до сканувального дзеркала (рис. 3), та горизонтальною і вертикальною площинами. Орієнтація осі цього пучка накладає обмеження на кути орієнтації робочої поверхні роз-

сіювача. У розглянутій тут конструкції приладу «СканПол» вісь цього пучка нахилена до горизонталі під кутом 34° і лежить у вертикальній площині (тобто азимутальний кут осі пучка становить 0°). Загалом вибір оптимального кута спостереження (орієнтації розсіювача відносно корпусу приладу) залежить від кутової характеристики коефіцієнта яскравості розсіювача і від кута падіння сонячного світла на розсіювач. У нашому випадку кут падіння, як показано далі, буде змінюватися у широких межах. Тому для мінімізування впливу сонячного світла, відбитого від сонячних панелей і поверхні корпусу супутника й приладу на процес радіометричного калібрування, доведеться використовувати кути падіння тільки при певних положеннях Сонця, що залежать від положення супутника на орбіті і її параметрів. Далі буде розглянуто можливі варіанти конструкції вузла калібрування і отримано оцінки для вибору оптимального положення Сонця у зазначеній системі координат супутника при заданих параметрах конструкції платформи «ЮжСат» (рис. 1). Будуть також зроблені оцінки впливу на положення Сонця відносно супутника головних параметрів орбіти: часу проходження супутником висхідного вузла на екваторі та нахилу орбіти до екватора.

Дифузний відбивач. Конструкція вузла калібрування буде найпростішою, якщо його будувати на основі дифузно розсіювального екрану, який освітлюється пучком світла безпосередньо від Сонця без проміжних оптичних деталей. Розсіювач (екран) у цьому випадку повинен орієнтуватися своєю робочою поверхнею у бік, протилежний векторові руху супутника. Вибір кутів орієнтації розсіювача залежить від його кутових розсіювальних характеристик, тобто від кутового коефіцієнта яскравості, або ж індикатриси розсіювання. З літературних джерел [8, 15, 27] відомо, що ці характеристики визначались або ж враховувались з вимірювань, які виконувались при фіксованих кутах освітлення (як правило, 0° чи близько цього, 45° і 60°) і змінних кутах спостереження, шляхом переміщення приладу, що вимірює потік розсіяного випромінювання. У випадку «СканПол» вимірювання розсіяного світла буде виконуватись при фіксованому кутові спостереження, який визначається орієнтацією розсіювача відносно вхідного сканувального дзеркала «СканПол», і змінних кутах освітлення при переміщенні супутника по орбіті.

Щоб скористатися вже відомими характеристиками розсіювачів, наприклад для скла МС20, ОНС1—4, наведених у роботі [8], або ж розсіювачів типу «Spectralon» [27], тут доведеться припустити, що кути освітлення, наведені там, у нашому випадку будуть кутами спостереження, а змінні кути спостереження у нас будуть інтерпретуватись як кути освітлення, що загалом мало б справджуватись для ламбертівського розсіювача. Наведені у роботі [8] кутові характеристики зразків скла типу МС20 і ОНС1—4, з яких виготовляються розсіювачі, що працюють на відбивання, свідчать, що їхні коефіцієнти яскравості практично рівномірні у широкому діапазоні кутів освіт-

лення (спостереження), однак при кутах спостереження (чи освітлення) 50 ...60 вже доволі швидко змінюються. Набагато детальніше розсіювальні характеристики досліджено для розсіювачів «Spectralon» у роботі [27]. Вимірювання $BRDF$ (Bidirectional Reflective Distribution Function) були виконані для кутів падіння 0 і 60 у діапазоні кутів розсіювання відносно нормалі до площини розсіювача (тобто кутів спостереження) від 0 до 80 при довжинах хвиль 0.25, 0.30, 0.50, 0.70 і 0.90 мкм. Слід зазначити, що практично рівномірну $BRDF$ у всьому зазначеному діапазоні кутів розсіювання для усіх довжин хвиль показали зразки «Spectralon» з коефіцієнтами відбивання від 0.2 до 0.4 з відхиленнями до 30 % для зразка з коефіцієнтом відбивання 99 % при куті падіння 0. Однак при куті падіння 60 величини $BRDF$ усіх зразків приблизно однаково нелінійно зростають зі збільшенням кута розсіювання, особливо для кутів, більших за 50 ...60.

Обчислення кута падіння A_i пучка сонячного світла на дифузний відбивач (далі — розсіювач) виконано у системі координат, центр якої збігається з центром робочої поверхні розсіювача, і головними площинами якої є площина орбіти супутника і площина, перпендикулярна до напрямку надир — зеніт (далі — горизонтальна площина). Тобто, головні площини і напрями цієї системи збігаються з використаними при обчисленнях положення Сонця. Відповідно, кут падіння відносно перпендикуляра до площини розсіювача визначається положенням Сонця у цій системі координат та орієнтацією площини розсіювача. Положення Сонця задається його зенітною відстанню Z_S та азимутальним кутом Сонця A_S у горизонтальній площині від напрямку вектора руху супутника ліворуч, а орієнтація розсіювача — зенітною відстанню Z_n перпендикуляра до площини розсіювача і азимутутом A_n цього перпендикуляра. Використано формулу косинусів до відповідного сферичного трикутника, що з'єднує положення Сонця, перпендикуляра до площини розсіювача і точку зеніту:

$$A_i = \arccos[\cos Z_S \cos Z_n - \sin Z_S \sin Z_n \cos(A_S - A_n)].$$

Тут кути положення Сонця Z_S та A_S обчислюються за його ефемеридою, як і вище, для відповідного положення супутника в орбіті, а кути орієнтації розсіювача Z_n та A_n задаються конструктивно з урахуванням напрямку оптичної осі світлового пучка від розсіювача до сканувального дзеркала, тобто кута спостереження.

Для обчислення кута спостереження використана аналогічна формула:

$$A_o = \arccos[\cos Z_o \cos Z_n - \sin Z_{Lb} \sin Z_n \cos(180 - A_n)].$$

Тут Z_o — кут нахилу оптичної осі пучка від центра розсіювача до сканувальних дзеркал відносно напрямку на зеніт, Z_{Lb} — кут нахилу світлового пучка від поверхні розсіювача до сканувального дзеркала відносно напрямку на зеніт (тут $Z_{Lb} = 90 + 34$), 180 — азимутальний кут оптичної осі цього пучка відносно курсу супутника, кути

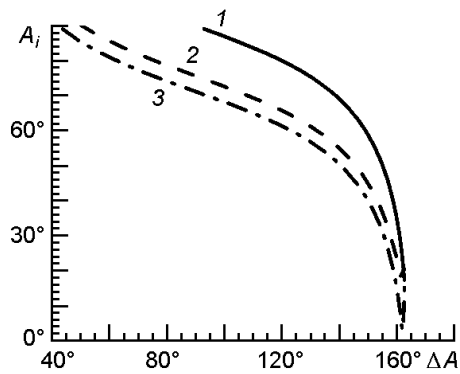
орієнтації розсіювача Z_n та A_n — ті ж, що й у попередній формулі.

Нижче наведені результати обчислень, виконаних на дати поблизу сонцестоянь (21 червня і 21 грудня) 2020 р., UTC = 10 год 00 хв, для орбіти висотою 705 км; нахилом 98.1° , при довготі висхідного вузла на земному екваторі 200° , з метою оцінки залежності кута падіння сонячного світла і кута спостереження від орієнтації розсіювача та від місцевого часу проходження супутником висхідного вузла орбіти, який визначає діапазон кутів положення Сонця відносно супутника. Кути падіння та спостереження при переміщенні супутника по орбіті наведені з моменту, коли кут падіння стає меншим за 90° і до моменту, коли зенітна відстань Сонця стає більшою за 90° . Як аргумент тут вибрано азимутальний кут Сонця, тому що головним чином від нього залежить, яким чином буде освітлюватись розсіювач світлом, відбитим від верхньої частини супутника (сонячні панелі) і корпусу «Скан-Пол». Кути відбивання від сонячних панелей і деталей корпусу апарата залежать і від зенітної відстані Сонця, але будуть освітлювати розсіювач тільки при певних граничних значеннях азимутального кута. Значення зенітних відстаней Сонця, відповідні до зазначених його азимутальних кутів, можна знайти за даними, наведеними на рис. 6 і 7, а положення супутника на орбіті можна оцінити також за даними, наведеними на рис. 5. Також діапазон зміни зенітної відстані ($90^\circ \dots 75^\circ$) та азимутального кута ($165^\circ \dots 180^\circ$) для нормалі до робочої поверхні розсіювача вибраний так, щоб кут спостереження був якомога меншим. Очевидно, що найменший кут спостереження у нашому випадку становить 34° , коли площина розсіювача перпендикулярна до горизонталі у місці положення супутника і до напрямку його руху (тобто орієнтована у протилежний бік).

На рис. 8 показано, як при переміщенні супутника по підсонячній частині орбіти з часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв залежить кут падіння сонячного світла на розсіювач від його орієнтації. У випадку, коли розсіювач встановлений так, що нормаль до його робочої поверхні лежить у площині орбіти та спрямована у бік, протилежний векторові руху супутника ($Z_n = 90^\circ$, $A_n = 180^\circ$), його робоча поверхня починає освітлюватись при мінімальних зенітних відстанях Сонця, коли його азимутальний кут близький до 90° . Мінімальний кут падіння становить приблизно 17.5° при зенітному куті Сонця 90° і азимутальному куті понад 160° . При цьому розсіювач буде освітлений від атмосфери і поверхні Землі у діапазоні кутів до 65° від надира, тому потрібно встановлювати додаткові світлозахисні екрани під розсіювачем.

Відхилення робочої поверхні розсіювача угору на 15° (тобто зменшення зенітної відстані нормалі до його поверхні до 75°) при тому ж її азимутальному куті 180° призводить до збільшення діапазону зміни азимутального кута Сонця, при якому освітлюється поверхня розсіювача (рис. 8). Освітлюватись робоча поверхня розсіювача починає вже

Рис. 8. Зміна кута падіння сонячного світла на дифузний розсіювач (екран) зі зміною азимутального кута Сонця при різних орієнтаціях розсіювача поблизу дня літнього сонцестояння на орбіті з місцевим середнім сонячним часом проходження висхідного вузла на екваторі 22 год 30 хв. Крива 1 — при кутах орієнтації розсіювача $A_n = 180$, $Z_n = 90$, кут спостереження $A_o = 34$; крива 2 — $A_n = 180$, $Z_n = 75$ при $A_o = 49$; крива 3 — $A_n = 165$, $Z_n = 75$ при $A_o = 51$



при азимутальному куті Сонця приблизно $55 \dots 60$ залежно від сезону, але кут спостереження при цьому збільшується до 49 . При цьому мінімальний кут падіння 17.4 настає при $A_s = 162$ і $Z_s = 76.3$ незалежно від сезону. Додатковий поворот розсіювача на 15 по азимутальному куту у бік Сонця ще покращує умови його освітлення, зокрема можливе освітлення прямим світлом від Сонця при куті падіння, меншому за 10 . Проте дещо збільшується кут спостереження до 51 . При цих діапазонах кутів падіння розсіювач буде додатково освітлюватись від Землі з діапазону кутів $15 \dots 65$ від надіра.

Вище було показано, що зенітна відстань Сонця відносно супутника істотно залежить від часу проходження вузла орбіти і у значно меншій мірі — від нахилу орбіти (рис. 6 і 7). Тому були виконані обчислення кута падіння сонячного світла на дифузний розсіювач з метою оцінки змін умов його освітлення на орбіті з різним часом проходження висхідного вузла супутником та при різних нахилах орбіти. Розглянуто обставини для двох орієнтацій дифузора ($Z_n = 90$, $A_n = 180$ та $Z_n = 75$, $A_n = 165$) на час проходження висхідного вузла 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв, поблизу дня літнього сонцестояння (рис. 9). Ці дані показують, що діапазон зміни кута падіння та його значення істотно різні на орбіті з різним часом проходження висхідного вузла.

Найменш сприятливі для калібрування умови освітлення екрана складаються на орбіті з часом проходження висхідного вузла 23 год 30 хв у кожному з випадків, оскільки при прийнятних азимутальних кутах Сонця кути падіння будуть великими, $A_i = 50$ протягом усього року. Нахил екрана у напрямі до зеніту та поворот по азимуту покращують ці умови, і на орбіті з часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв і 21 год 30 хв можливе калібрування «СканПол» і при відносно малих кутах падіння, навіть менших за 10 (рис. 8). Однак у діапазоні малих значень кут падіння змінюється дуже швидко при переміщенні супутника по орбіті, що може призвести до збільшення похибок калібрування приладу. Також слід зазначити, що при орієнтації розсіювача з нахилом відносно зеніту ($Z_n = 75$) та поворотом по азимуту ($A_n = 165$, рис. 9), діапазон кута падіння менше

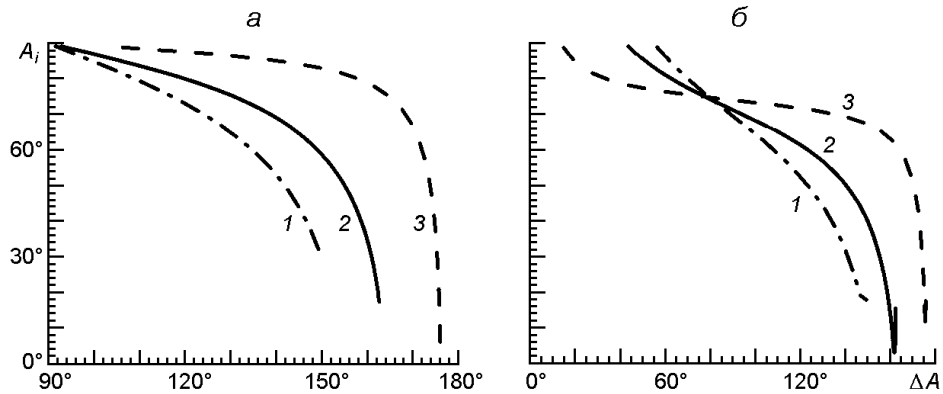


Рис. 9. Зміна кута падіння сонячного світла на дифузний розсіювач (екран) зі зміною азимутального кута Сонця на орбіті з різним часом проходження висхідного вузла поблизу дня літнього сонцестояння при орієнтації розсіювача: *a* — $A_n = 180$, $Z_n = 90$; *б* — $A_n = 165$, $Z_n = 75$. Криві 1, 2, 3 відповідають моментам проходження висхідного вузла о 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв

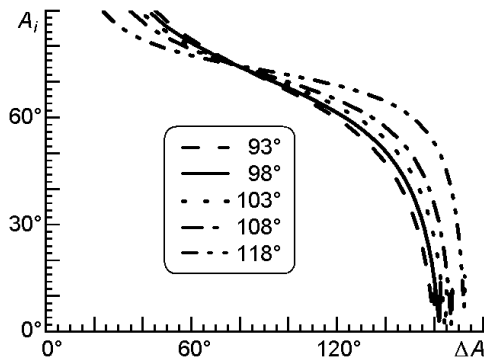


Рис. 10. Зміна кута падіння сонячного світла на дифузний розсіювач (екран) зі зміною нахилу орбіти супутника у межах 93 ...118 для часу проходження висхідного вузла 22 год 30 хв і кутах орієнтації розсіювача $Z_n = 75$ і $A_n = 165$

змінюється при зміні часу проходження супутником висхідного вузла орбіти, ніж при інших розглянутих вище орієнтаціях. Тобто така орієнтація дифузора оцінюється як найвигідніша.

Кут падіння залежить також від нахилу орбіти. Для оцінки такої залежності були виконані обчислення кута падіння пучка сонячного світла на дифузор для орбіти з часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв при зміні її нахилу у межах 25°, від 93° до 118°, при кутах орієнтації дифузора $Z_n = 75$ і $A_n = 165$ (рис. 10). Хоч зміна нахилу орбіти і призводить до певних змін розподілу кута падіння уздовж підсонячної частини орбіти, однак у всіх випадках незалежно від сезону зберігається можливість виконувати калібрування приладу «СканПол» при значеннях цього кута приблизно 10 ...15° при куті спостереження 51°.

Таким чином, одержані дані показують, що для розглянутої тут конструкції калібрувального вузла при виборі орієнтації дифузного розсіювача доцільно детально досліджувати розсіювальні властивості дифузійних екранів у широкому діапазоні кутів падіння світла на них і при відносно великих кутах спостереження, до більш ніж 50°. Також при виборі орієнтації такого розсіювача слід буде врахувати його

розташування відносно інших елементів конструкції супутника, зокрема сонячних панелей. Крім того, слід буде передбачити спеціальні екрани для захисту робочої поверхні дифузора від освітлення знизу світлом, розсіяним поверхнею і атмосферою Землі.

Пристрій з дифузним пропусканням. Як вже зазначено, з орбіти висотою 705 км лінія горизонту (тут за лінію горизонту прийнято поверхню на висоті приблизно 100 км від поверхні земного сфероїда) буде спостерігатися під кутом приблизно 113.5° відносно зеніту, тобто під кутом 23.5° від горизонтальної площини у бік надира. Це означає, що відбите від Землі світло буде освітлювати супутник з конуса з кутом при вершині приблизно 133° (66.5° відносно надира), і робоча поверхня розсіювача повинна бути захищеною від нього. Для приладу «СканПол», встановленому на космічному апараті (КА) «ЮжСат», зазначені умови освітлення для розсіювача, що пропускає світло, можна забезпечити, встановивши його на верхній площині корпусу супутника, у місці перетину з нею світлового пучка, показаного на рис. 4.

Як і у попередньому випадку, кут падіння пучка сонячного світла на передню поверхню розсіювача відраховується від нормалі до цієї поверхні і визначається зенітною відстанню цієї нормалі і її азимутом у системі координат з центром у геометричному центрі розсіювача, головними площинами якої є площина орбіти і горизонтальна площина, що проходить через центр розсіювача і перпендикулярна до площини орбіти у місці положення КА, а азимут нормалі до поверхні розсіювача буде відраховуватись від напрямку курсового вектора КА. Кут спостереження відраховується від напрямку нормалі до задньої поверхні розсіювача, це кут між нормаллю до задньої поверхні розсіювача і напрямком осі оптичного пучка від розсіювача до першого дзеркала сканувальної системи. Тут прийнято, що кут нахилу осі пучка становить 34° (56° від напрямку у зеніт) до горизонтальної площини (рис. 4), і вісь пучка лежить у площині орбіти. Згідно з наведеними у роботі [8] даними про кутові характеристики розсіювання зразків молочного скла типу МС12 і МС23, призначених саме для дифузного пропускання світла, індикатриса розсіювання помітно витягнута у напрямку падіння світлового пучка. Тому кут спостереження повинен бути якомога ближчим до 0°, або ж принаймі для вибору оптимальної орієнтації розсіювача можна використати умову мінімальності суми кутів падіння і спостереження. Хоча остаточно це повинно бути визначене з вимірювань кутового розподілу яскравості конкретних зразків цього скла.

Кут падіння обчислюється за тією ж формулою, що і для дифузного відбивача, а кут спостереження — за відповідно модифікованою формулою:

$$A_o = \arccos[\cos Z_{Lb} \cos(Z_n) + \sin Z_{Lb} \sin(Z_n) \cos(A_n)],$$

де Z_{Lb} — кут нахилу відносно напрямку на зеніт світлового пучка від

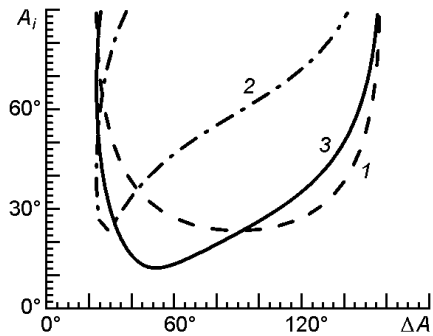


Рис. 11. Зміна кута падіння уздовж орбіти супутника з нахилом 98.1 і часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв при різних орієнтаціях розсіювача: (1) $Z_n = 0$, $A_n = 0$, $A_o = 56$; (2) $Z_n = 56$, $A_n = 0$, $A_o = 0$; (3) $Z_n = 23$, $A_n = 30$, $A_o = 37.3$

задньої поверхні розсіювача до сканувального дзеркала (тут, як і вище, $Z_{Lb} = 90 + 34$); кути орієнтації розсіювача Z_n та A_n ті ж, що й у попередніх формулах.

Зміну кута падіння уздовж орбіти супутника при різних орієнтаціях розсіювача показано на рис. 11.

Ці обчислення виконано для орбіти з нахилом 98.1 і місцевим сонячним часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв. За цими даними можна зробити висновок, що оптимальною буде орієнтація розсіювача з відхиленням вхідної поверхні від зеніту 23 та поворотом по азимуту приблизно 30 ліворуч по курсу супутника. Така орієнтація повністю забезпечує уникнення освітлення вхідної поверхні розсіювача світлом, розсіяним від атмосфери, а також забезпечує достатньо малий кут спостереження ($A_o = 37.5$), а кут падіння може бути меншим 10. При цьому поворот поляриметра по азимуту дозволяє ще зменшити кут падіння, хоча при цьому буде збільшений і кут спостереження. Так, при $A_n = 45$ матимемо $A_o = 42$. Обчислення показали, що найменші значення кутів падіння й спостереження будуть при орієнтації розсіювача зі значенням Z_n у межах від 22 до 23, а A_n — у межах від 25 до 45. При цьому кут спостереження буде становити приблизно від 37 до 42, а мінімальне значення кута падіння буде у межах 2 ...15.

Оцінки ефектів від часу проходження супутником вузла орбіти та її нахилу тут були зроблені для орієнтації розсіювача з $Z_n = 23$ і $A_n = 30$ (рис. 12 і 13).

У цьому випадку, як і слід очікувати, найменший діапазон зміни кута падіння буде при найбільш ранньому проходженні висхідного вузла (21 год 30 хв), і найбільший — при найпізнішому (23 год 30 хв), і мінімальних значень ($A_i = 10$) він досягає саме для орбіт з часом проходження, ближчим до місцевої півночі (рис. 12). Тобто, на орбіті з часом проходження висхідного вузла 22 год 30 хв складаються достатньо сприятливі умови для калібрування приладу «СканПол» за Сонцем.

Зміна нахилу орбіти менше впливає на зміну кута падіння сонячного світла на розсіювач з пропусканням, ніж зміна часу проходження вузла орбіти, і на орбіті з нахилом від приблизно 93 до 118 (тобто у

Рис. 12. Зміна кута падіння сонячного світла на розсіювач з дифузним пропусканням зі зміною азимутального кута Сонця на орбіті з нахилом 98.1° та з різним часом проходження висхідного вузла при кутах орієнтації розсіювача $Z_n = 23^\circ$ і $A_n = 30^\circ$. Моменти проходження висхідного вузла: 1 — 21 год 30 хв, 2 — 22 год 30 хв, 3 — 23 год 30 хв

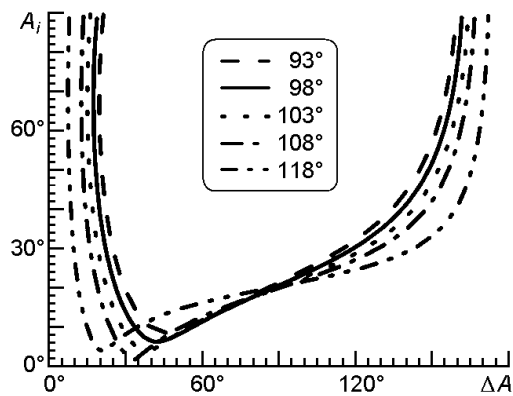
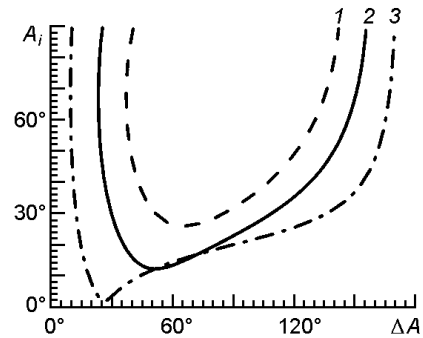


Рис. 13. Зміна кута падіння сонячного світла на розсіювач з дифузним пропусканням для часу проходження висхідного вузла 22 год 30 хв при кутах орієнтації розсіювача $Z_n = 23^\circ$ і $A_n = 30^\circ$ зі зміною нахилу орбіти супутника від 93° до 118°

діапазоні зміни нахилу до 25°) зберігаються достатньо сприятливі умови освітлення розсіювача, а мінімальний кут падіння $A_i = 10^\circ$.

Ці дані дають можливість оцінити, яка з орієнтацій розсіювача відносно корпусу буде прийнятною, якщо врахувати його кутову характеристику яскравості при різних кутах спостереження і освітлення. Розташування розсіювача на корпусі та його орієнтація будуть уточнені після детальних вимірювань характеристик розсіювачів.

ОБГОВОРЕННЯ

Огляд матеріалів, що використовуються як розсіювачі у фотометричних приладах, зокрема космічного базування, дозволяє зробити висновки, що у вузлі радіометричного калібрування поляриметра «Скан-Пол» за Сонцем як розсіювач доцільно використовувати дифузори, виконані на основі молочного скла, зокрема типу МС12, МС20, МС23, та політетрафлюоретилену. Аналіз умов освітлення поляриметра «СканПол» на попередньо встановленій орбіті, параметри та межі варіації якої вказано вище, аналіз конструкції «СканПол» та платформи «ЮжСат» показав, що вузол радіометричного калібрування можна по-

будувати як на основі дифузного відбивача, так і на основі дифузного розсіювача.

Для визначення оптимального розміщення вузла калібрування та деталізування його конструкції оцінено зміни положення Сонця відносно головних площин корпусу поляриметра «СканПол» при його русі у складі супутникової платформи «ЮжСат» по коловій сонячно-синхронній приполярній орбіті висотою 705 км з періодом обертання 98.7 хв, часом проходження висхідного вузла на екваторі 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв та можливими нахилами відносно екваторіальної площини 93° , 98° , 103° .

Параметри конструкції вузла сканування «СканПол» визначають напрям, з якого може надходити пучок сонячного світла від калібрувального пристрою на вхід блоку сканування «СканПол» (див. рис. 3 і 4). При цьому оптимальним вбачається розмістити дифузний розсіювач у передній верхній частині корпусу приладу і зорієнтувати його робочою поверхнею у верхню півсферу. Тоді можна забезпечити кут падіння сонячного світла на розсіювач, істотно менший від 90° , а робоча поверхня розсіювача буде максимально захищена від світла, розсіяного земною поверхнею, атмосферою та світлом, відбитим від поверхонь і деталей конструкції супутника.

Як було зазначено, конструкція вузла калібрування буде найпростішою, якщо його будувати на основі дифузного відбивача (дифузний розсіювальний екран), який освітлюється пучком світла безпосередньо від Сонця без проміжних оптичних деталей. Розсіювач (екран) у цьому випадку повинен бути орієнтований своєю робочою поверхнею у бік, протилежний векторові руху супутника, оскільки сканувальне дзеркало, на яке повинен потрапляти пучок світла від розсіювача, своєю робочою поверхнею буде спрямоване у напрямку руху супутника (див. рис. 1, 2, 4). При кутах орієнтації екрана $Z_n = 75^\circ$ і $A_n = 165^\circ$ є можливість радіометричного калібрування «СканПол» на орбіті незалежно від сезону. Як показують розрахунки, зміна нахилу орбіти у розглянутих межах слабо впливає на значення кута падіння сонячного випромінювання на екран. Так, мінімальне значення кута падіння змінюється у межах $10^\circ \dots 15^\circ$ при куті спостереження 51° , що дозволяє виконувати калібрування приладу «СканПол».

У випадку побудови вузла калібрування на основі розсіювача з дифузним пропусканням, доцільно даний розсіювач встановити на верхній площині корпусу супутника, у місці перетину з нею світлового пучка, показаного на рис. 4. Обчислення показали, що найменші значення кутів падіння й спостереження будуть при орієнтації розсіювача зі значенням Z_n у межах $22 \dots 23^\circ$, а A_n — у межах $25 \dots 30^\circ$. При цьому кут спостереження буде становити приблизно від 37° до 42° , а мінімальне значення кута падіння буде у межах $2 \dots 15^\circ$. Як було встановлено, зміна нахилу орбіти менше впливає на зміну кута падіння сонячного світла на розсіювач з пропусканням, ніж зміна часу проходження вузла орбіти. Таким чином, як і випадку дифузного

відбивача, сприятливі умови освітлення розсіювача з пропусканням зберігаються і на орбіті з нахилом приблизно від 93° до 118° .

Зрозуміло, що реальні значення параметрів орбіти супутника можуть дещо відрізнитись від значень, використаних у розрахунках у нашій роботі, і їх необхідно буде враховувати при визначенні оптимальних моментів для радіометричного калібрування поляриметра «СканПол». Оптимальну орієнтацію розсіювача також доведеться уточнювати з огляду на характеристики конкретного його екземпляра. Проте основні сформульовані вимоги та оцінки, розглянуті у даній роботі, дозволяють визначити конструкцію вузла калібрування, його розміщення у корпусі «СканПол» та залежності його характеристик від зміни умов освітлення.

ВИСНОВКИ

Калібрування супутникових поляриметрів для дистанційних досліджень аерозолів у земній атмосфері необхідне для контролю їхніх характеристик, що можуть змінюватись як під дією значних механічних навантажень при виведенні на орбіту, так і під впливом умов у космічному просторі. Для калібрування приладів, що виконують вимірювання у оптичному спектрі, як правило використовується потік світла від Сонця. При цьому важливою є конструкція пристрою, за допомогою якого сонячне світло передається на вхідну апертуру таких приладів. Конструкція такого пристрою повинна забезпечувати освітлення вхідної апертури в умовах, коли положення Сонця відносно космічного апарата істотно змінюється уздовж орбіти. Вона має бути захищеною від додаткового освітлення світлом, розсіяним на елементах конструкції космічного апарата та самого приладу, а також від Землі. Основним елементом такого пристрою є розсіювач (дифузор), який може забезпечити освітлення вхідної апертури приладу при зміні кута падіння сонячного світла на нього у широкому діапазоні. Найважливішими характеристиками такого розсіювача є спектральний діапазон, а також індикатриса розсіювання, яка має бути якомога ближчою до ламбертівської. У випадку поляриметра «СканПол» діапазон доволі широкий — приблизно від 0.35 мкм до 1.7 мкм . Тому важливо вибрати матеріал з відповідними характеристиками, здатний працювати в умовах відкритого космосу.

У статті наведений короткий огляд відповідних оптичних матеріалів, а також виконано обчислення кута падіння сонячного світла на розсіювач протягом переміщення космічного апарата уздовж сонячно-носинхронної колової приполярної орбіти з висотою приблизно 700 км . При цьому враховано, що зміна положення Сонця відносно супутника уздовж орбіти істотно залежить від таких її параметрів, як нахил до екватора та час проходження висхідного вузла на екваторі. Обчислення виконано для орбіти з різними нахилами до екватора у

діапазоні від 93 до 118 , а також для різних моментів проходження висхідного вузла. При цьому розглянуто різні орієнтації робочої поверхні розсіювача відносно оптичної осі телескопів приладу «СканПол» задля оцінки можливостей вибору оптимальної орієнтації. Розглянуто можливість використання у таких умовах розсіювача, що працює як дифузний відбивач, так і розсіювач, що пропускає розсіяне світло.

Результати, отримані для розглянутих параметрів розсіювача і його розташування, показують, що для будь-якої з розглянутих конструкцій вузла калібрування при переміщенні супутника по орбіті кути падіння сонячного світла на робочу поверхню розсіювача і кут його спостереження будуть залежати від параметрів орбіти супутника. Положення супутника на орбіті, при якому складатимуться найсприятливіші умови для виконання процедури калібрування, залежать від кутових характеристик розсіювання дифузора. Тому для вибору оптимальної конструкції вузла калібрування приладу «СканПол» слід детально виміряти ці кутові характеристики.

За розсіювальними та спектральними характеристиками для вузла калібрування з розсіювачем, що працює на відбивання, найкраще підходить розсіювач «Spectralon», який широко використовується у таких пристроях супутникових приладів. Проте у випадку такої конструкції калібрувального вузла на супутнику «ЮжСат» необхідно буде враховувати високу імовірність додаткового освітлення його робочої поверхні світлом, розсіяним та дзеркально відбитим деталями конструкції супутника (сонячні панелі, деталі корпусу). Це накладає обмеження на вибір придатного для процедури калібрування положення супутника на орбіті. Також робоча поверхня розсіювача буде освітлюватись світлом, розсіяним земною атмосферою і поверхнею у діапазоні кутів до 65° від надира. Тобто, для екранування такого паразитного освітлення необхідно встановлювати відповідні додаткові елементи захисту. Встановити розсіювач, що працює на відбивання, так, щоб уникнути такого паразитного освітлення, у наявній конструкції приладу «СканПол» неможливо.

Найефективнішим засобом уникнути впливу розсіяного світла як від деталей конструкції супутника, так і від поверхні та атмосфери Землі для розглянутої тут конфігурації супутника і приладів проєкту «Аерозоль-УА» буде використання розсіювача, що працює на пропускання. Згідно з характеристиками розглянутих у статті матеріалів для цього можна розглянути скло типу МС12 і МС23, хоча для використання такої схеми радіометричного калібрування необхідно додатково дослідити спектральні характеристики цих марок скла.

Подяки. Ця робота була підтримана: НАН України в рамках Цільової комплексної програми з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр. через договір 03/22, Україна; Київським національним університетом імені Тараса Шевченка через договори 20БФ051-02 та

БФ/30-2021; Міжнародним центром науки майбутнього, Коледж фізики, Цзілінський університет, Китай. Робота також була частково підтримана Програмою досліджень та інновацій Європейського Союзу Horizon 2020 в рамках договору про грантовий договір Marie Skłodowska № 778349 GRASP-ACE та інноваційної програми в рамках грантового договору ASTRIS-2 № 654109. Автори також дякують за підтримку Програмі Європейської комісії Horizon 2020, яка фінансувала проєкт ERA-PLANET/SMURBS.

1. Абалакин В. К. *Основы эфемеридной астрономии*. 1979. М.: Наука. 448 с.
2. Дума Д. П. *Загальна астрометрія*. 2007. Київ: Наукова Думка, 600 с.
3. Коленко Е. А. *Технология лабораторного эксперимента. Справочник*. 1994. Санкт-Петербург: Политехника. 751 с.
4. Зверев В. А., Кривоустова Е. В., Точилина Т. В. *Оптические материалы. Часть 2. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов*. СПб: СПбГУ ИТМО. 2013. 248 с.
5. Михеєнко Л. А., Гришко Т. А., Котляренко Т. В. Диффузний излучатель переменной яркости на базе матрицы светоизлучающих диодов с рассеивателем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. 1. С. 74—81.
6. Михеєнко Л. А., Анікієнко Н. В. Методи покращення метрологічних характеристик дифузного випромінювача змінної яскравості. *Вісник НТУУ КПІ. Серія Приладобудування*. 2014. 48(2). С. 118—124.
7. Михеєнко Л. А., Пугіна М. О. Робочий еталон яскравості на базі інтегровальної сфери з розсіювачем. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. 4. С. 9—15.
8. Панов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В., Погарев В. В., Левинзон А. М., Долгинский И. М., Михайлов Н. А., Резницкий Б. Г., Калинин М. И., Рагузин Р. М. (1980). *Справочник конструктора оптико-механических приборов*. 1980. Л.: Машиностроение, 742 с.
9. Снявський І. І., Міліневський Г. П., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Данилевський В. О., Розенбуш В. К., Бовчалюк А. П., Лукенюк А. А., Шимків А. П., Міщенко М. І. Методика, апаратне забезпечення та валідація супутникових досліджень атмосферного аерозолі: перші результати підготовки до космічного експерименту «Аерозоль-УА». *Космічна наука і технологія*. 2015. 21(3), С. 9—17.
10. Снявський І. І., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г., Міліневський Г. П., Кошман Г. В. Мультиспектральний іміджер-поляриметр космічного проєкту «Аерозоль-УА». *Космічна наука і технологія*. 2018. 24(3). С. 23—32. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.023>.
11. Смердов Е. И., Вайсеро М. В., Добришина М. Г., Кавун В. В. Особенности интеграции микроспутниковой платформы YuzhSat с различными типами полезной нагрузки. 17th Ukrainian Conference on Space Research: Abstracts. Odesa. 2017. 145.
12. Arenas J. P., Margasahayam R. N. Noise and vibration of spacecraft structures. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. 2006. 14(3). P. 251—264.
13. Vaccaro S., Piegari A., Di Sarcina I., Cecilia A. Effect of gamma irradiation on optical components. *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 2005. 52(5). P. 1779—1784.
14. Bäumer S., Werij H. Space optics. *Adv. Opt. Techn.* 2018. 7(6). P. 351—352.

15. Cairns B., Russel E., Travis L. D. The research scanning polarimeter: Calibration and ground-based measurements. *SPIE*. 1999. 3754. P. 186—196.
16. Cairns B., Geogdzhayev I. *Aerosol polarimetry sensor calibration*. Document GSFC 421. 7-70-03, GSFC, Greenbelt, Maryland, USA. 2010. 43 p.
17. Chrien N. L., Bruegge C. J., Ando R. R. Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) on-board calibrator (OBC) in-flight performance studies. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2002. 40(7). P. 1493—1499.
18. Clarke F. J. J., Garforth F. A., Parry D. J. Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials. *Lighting Res. and Technol.* 1983. 15(3). P. 133—149.
19. Dinguirard M., Slater P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. *Remote Sens. Environ.* 1999. 68. P. 194—205.
doi: 10.1016/S0034-4257(98)00111-4.
20. Dobber M. R., Dirksen R. J., Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Voors R. H. M., Kleipool Q., Jaross G., Kowalewski M., Hilsenrath E., Leppelmeier G. W., de Vries J., Dierssen W., Rozemeijer N. C. Ozone Monitoring Instrument Calibration. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2006. 44(5). P. 1209—1238.
doi:10.1109/TGRS.2006.869987.
21. Dubovik O., Li Z., Mishchenko M. I., Tanre D., Karol Y., Bojkov B., Cairns B., Diner D. J., Espinosa W. R., Goloub P., Gu X., Hasekamp O., Hong J., Hou W., Knobelspiesse K. D., Landgraf J., Li L., Litvinov P., Liu Y., Lopatin A., Marbach T., Maring H., Martins V., Meijer Y., Milinevsky G., Mukai S., Parol F., Qiao Y., Remer L., Rietjens J., Sano I., Stammes P., Stamnes S., Sun X., Tabary P., Travis L. D., Waquet F., Xu F., Yan C., Yin D. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2019. 224. P. 474—511.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.024>.
22. Dymshits O. S., Zhilin A. A., Shashkin A. V. The new SOO-U6 and SOO-I8 light-scattering glass-ceramics. *J. Opt. Technol.* 2009. 76(3). P. 158—159.
doi:10.1364/JOT.76.000158.
23. Eplee Jr. R. E., Meister G., Patt F. S., Barnes R. A., Bailey S. W., Franz B. A., McClain C. R. On-orbit calibration of SeaWiFS. *Appl. Optics.* 2012. 51(36). P. 8702—8730.
24. *Explanatory supplement to the astronomical almanac*. Ed. Seidelmann P. K. University Science Books, Mill Valley, California. 1992. 752 p.
25. Galvin R. P. *Transmissive diffuser with a layer of polytetrafluoroethylene on the output surface for use with an on-orbit radiometric calibration*. USA Patent No. 7482572 B1. Jan. 2009. 27.
26. Garoli D., De Marcos L., Larruquert J., Corso A., Zaccaria R., Pelizzo M. Mirrors for Space Telescopes: Degradation Issues. *Applied. Sci.* 2020. 10. 7538.
27. Georgiev G. T., Butler J. J. BRDF study of gray-scale Spectralon. *Proc. SPIE*. 2008. 7081. P. 708107.
28. Gérard B., Deuzé J.-L., Herman M., Kaufman Y. J., Lallart P., Oudard C., Remer L. A., Roger B., Six B., Tanre D. Comparisons between POLDER 2 and MODIS/Terra aerosol retrievals over ocean. *J. Geophys. Res.* 2005. 110. D24211.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006218>.
29. Höpe A. Diffuse reflectance and transmittance. *Experim. Methods in Phys. Sci.* 2014. 46. P. 179—219. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386022-4.00006-6>.
30. Keski-Kuha R. A., Bowers C. W., Quijada M. A., Heaney J. B., Gallagher B., McKay A., Stevenson I. James Webb Space Telescope optical telescope element mirror coatings. *Proc. SPIE*. 2012. 8442. 84422J.

31. Lei X., Zhu S., Li Z., Hong J., Liu Z., Tao F., Zou P., Song M., Li C. Integration model of POSP measurement spatial response function. *Opt. Express*. 2020. 28(17). P. 25480—25489. doi:10.1364/OE.393897.PMID:32907068.
32. Milinevsky G., Oberemok Y., Syniavskiy I., Bovchaliuk A., Kolomiets I., Fesianov I., Wang Y. Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2019. 229(5). P. 92—105. doi:10.1016/j.jqsrt.2019.03.007.
33. 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, 292—300. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00945765/123>.
34. Noble H., Lam W. T., Smith G., McClain S., Chipman R. A. Polarization scattering from a Spectralon calibration sample. *Proc. SPIE*. 2007. 6682. P. 668219.
35. Pawluczyk R. Holographic diffusers. *Proc. SPIE*. 1993. 2042. P. 156—169.
36. Peralta R. J., Nardell C., Cairns B., Russell E. E., Travis L. D., Mishchenko M. I., Fafaul B. A., Hooker R. J. Aerosol polarimetry sensor for the Glory mission. *Proc. SPIE*. 2007. 6786, MIPPR 2007: automatic target recognition and image analysis, and multispectral image acquisition, 67865L. doi: 10.1117/12.783307.
37. Persh S., Shaham Y. J., Benami O., Cairns B., Mishchenko M. I., Hein J. D., Fafaul B. A. Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor. *Proc. SPIE*. 2010. 7807. P. 780703-1 — 780703-12. doi: 10.1117/12.862029.
38. *Reflectance Characteristics of Accurflect™ light reflecting ceramic*. Accuratus Corporation. 2010. URL: <http://accuratus.com>.
39. Scharton T. D. Vibration and acoustic testing of spacecraft. *Sound and Vibration*. 2002. 36(6). P. 14—18.
40. Shimadzu 2021. Example of reflectance measurement using integrating sphere: difference of spectra depending on white reference plate. *Shimadzu Excellence in Sci. Appl. News*. 2021. № A639. URL: www.shimadzu.com/an/.
41. Soares C., Mikatarijan R. *Understanding and control of external contamination on the international space station*. ESA SP-540 Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, June 16-20. 2003, Noordwijk, The Netherlands. Noordwijk: ESA. September 2003. P. 189—195.
42. Standish E. M. *JPL Planetary and lunar ephemerides. DE405/LE405*, 1998. JPL IOM 312. F-98-048.
43. Sun J., Xiong X. Solar and lunar observation planning for Earth-observing sensors. *Proc. SPIE*. 2011. 8176. P. 817610-1 — 817610-10. doi:10.1117/12.897751.
44. Symmons A., Lifshutz M. *Field guide to infrared optical materials*. Bellingham, Washington: SPIE Press. 2021. 212 p. <https://www.spiedigitallibrary.org/ebooks>.
45. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Danylevsky V., Bovchaliuk A., Fesianov I., Milinevsky G., Savenkov S., Yukhymchuk Yu., Sosonkin M., Ivanov Yu. Aerosol-UA satellite mission for the polarimetric study of aerosols in the atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2021. 267. 107601, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107601>.
46. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Ivanov Yu., Sosonkin M. Multispectral polarization state analyzer of scanning polarimeter ScanPol. *Int. J. Optics*. 2020. ID 1695658. <https://doi.org/10.1155/2020/1695658>.
47. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Ivanov Yu., Sosonkin M., Kireyev V., Akinin K. Scan mirror assembly for the multispectral scanning polarimeter of Aerosol-UA space mission. *Int. J. Optics*. 2021. ID 8854505. <https://doi.org/10.1155/2021/8854505>.

48. Tanré D., Kaufman Y. J., Herman M., Mattoo S. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.* 1997. 102. 16971-88. doi:10.1029/96JD03437.
49. Wadle S., Lakes R. S. Holographic diffusers: polarization effects. *Opt. Engineering.* 1994. 33(4). P. 1084—1088.
50. Wadle S., Wuest D., Cantalupo J., Lakes R. S. Holographic diffusers. *Opt. Engineering.* 1994. 33(1). P. 213—218.
51. Wang Z., Xiong X., Fulbright J., Lei N. VIIRS day/night band radiometric calibration stability monitoring using the Moon. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. 122. P. 5616—5624. doi:10.1002/2016JD026372.
52. Wang W., Zhang L.-M., Xu W., Si X.-L., Huang W.-X. A method for monitoring solar diffuser's bidirectional reflectance distribution function degradation in geostationary orbit. *Eur. J. Remote Sens.* 2020. 53(1). P. 132—144. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1747948>.
53. Weidner V. R. White opal glass diffuse spectral reflectance standards for the visible spectrum (SRM's 2015 and 2016). National Bureau of Standards Special Publication, 260-82. U.S. Government Printing Office, Washington. 1983. 33 p.
54. Wolf W. L., Zissis G. J. (eds). *The infrared handbook*. Washington DC. 1978. 1765 p.
55. Xiong X., Sun J., Xiong S., Barnes W. L. Using the Moon for MODIS on-orbit spatial characterization. *Proc. SPIE.* 2004. 5234. P. 480—487. doi:10.1117/12.510570.
56. Xiong X., Butler J. J. MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. *Remote Sens.* 2020. 12. P. 2523-1 — 2523-23. doi:10.3390/rs12162523.
57. Xiong X., Sun J., Barnes W., Salomonson V., Esposito J., Erives H., Guenther B. Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Reflective Solar Bands. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2007. 45(4). P. 879—889. doi:10.1109/TGRS.2006.890567.
58. Xiong X., Sun J., Xiong S., Barnes W. L. Using the Moon for MODIS on-orbit spatial characterization. *Proc. SPIE.* 2004. 5234, 480-7. doi: 10.1117/12.510570.
59. Yang H. C., Yang B. Y., Song M. X., Zou P., Sun X. B., Hong J. Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter. *Chinese J. Lasers.* 2018. 45(11), ID 1110002.

REFERENCES

1. Abalakin V. K. (1979). *The basics of emeritid astronomer*. Moscow. Nauka. 448.
2. Duma D. P. (2007). *General astrometry*. Kyiv, Naukova Dumka. 600.
3. Kolenko E. A. (1994). *Experimental laboratory technology. Handbook*. Polytechnik, St. Petersburg. 751.
4. Zverev V. A., Kryvopustova E. V., Tochilina T. V. (2013). *Optical materials. Part 2. Textbook for designers of optical systems and devices*. St. Petersburg: SPbSU ITMO. 248.
5. Mikheenko L. A., Gryshko T. A., Kotlyarenko T. V. (2013). Diffuse emitter of variable brightness based on a matrix of light-emitting diodes with a diffuser. *Measuring and computing devices in technological processes*. 1. 74—81.
6. Mikheenko L., Anikienko N. (2014). The methods of improving the metrological characteristics of diffuse emitter of variable brightness. *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.* 48(2). 118—124.
7. Mikheienko L. A., Puhina M. O. (2015). Working standart of brightness based on integrating sphere with diffuser. *Visnyk of Vinnytsia Polytech. Inst.* 4. 9—15.

8. Panov V. A., Kruger M. Y., Kulagin V. V., Pogarev V. V., Levinson A. M., Dolinskyi I. M., Mikhailov N. A., Resnitskiy B. G., Kalinin M. I., Ragusin R. M. (1980). *Text-book for designers of optical-mechanical devices*. Leningrad, Mashinostroenie. 742.
9. Syniavskiy I. I., Milinevsky G. P., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Danylevsky V. O., Rosenbush V. K., Bovchaliuk A. P., Lukenyuk A. A., Shymkiv A. P., Mishchenko M. I. (2015). Methodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the Aerosol-UA space experiment development. *Space Sci. and Technol.* 21(3). 9—17. doi.org/10.15407/knit2015.03.009
10. Syniavskiy I. I., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Milinevsky G.P., Koshman G. (2018). Multispectral imager-polarimeter of the “AEROSOL-UA” space project. *Space Sci. and Technol.* 24(3). 23—32. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.023>.
11. Smerdov E. I., Vaysero M. V., Dobryshina M. G. (2017). Features of the integration of the YuzhSat microsatellite platform with various types of payload. *17th Ukrainian Conference on Space Research: Abstracts*, 145, Odesa.
12. Arenas J. P., Margasahayam R. N. (2006). Noise and vibration of spacecraft structures. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. 14(3). 251—264.
13. Baccaro S., Piegari A., Di Sarcina I., Cecilia A. (2005). Effect of gamma irradiation on optical components. *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 52(5). 1779—1784.
14. Bäumer S., Werij H. Space optics. (2018). *Adv. Opt. Techn.* 7(6). 351—352.
15. Cairns B., Russel E., Travis L. D. (1999). The research scanning polarimeter: Calibration and ground-based measurements. *SPIE*. 3754. 186—196.
16. Cairns B., Geogdzhayev I. (2010). *Aerosol polarimetry sensor calibration*. Document GSFC 421. 7-70-03, GSFC, Greenbelt, Maryland, USA. 43.
17. Chrien N. L., Bruegge C. J., Ando R. R. (2002). Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) on-board calibrator (OBC) in-flight performance studies. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 40(7). 1493—1499.
18. Clarke F. J. J., Garforth F. A., Parry D. J. (1983). Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials. *Lighting Res. and Technol.* 15(3). 133—149.
19. Dinguirard M., Slater P. N. (1999). Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. *Remote Sens. Environ.* 68. 194—205. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00111-4.
20. Dobber M. R., Dirksen R. J., Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Voors R. H. M., Kleipool Q., Jaross G., Kowalewski M., Hilsenrath E., Leppelmeier G. W., de Vries J., Dierssen W., Rozemeijer N. C. (2006). Ozone Monitoring Instrument Calibration. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 44(5). 1209—1238. doi:10.1109/TGRS.2006.869987.
21. Dubovik O., Li Z., Mishchenko M. I., Tanre D., Karol Y., Bojkov B., Cairns B., Diner D. J., Espinosa W. R., Goloub P., Gu X., Hasekamp O., Hong J., Hou W., Knobelspiesse K. D., Landgraf J., Li L., Litvinov P., Liu Y., Lopatin A., Marbach T., Maring H., Martins V., Meijer Y., Milinevsky G., Mukai S., Parol F., Qiao Y., Remer L., Rietjens J., Sano I., Stammes P., Stamnes S., Sun X., Tabary P., Travis L. D., Waquet F., Xu F., Yan C., Yin D. (2019). Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 224. 474—511. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.024>.
22. Dymshits O. S., Zhilin A. A., Shashkin A. V. (2009). The new SOO-U6 and SOO-I8 light-scattering glass-ceramics. *J. Opt. Technol.* 76(3). 158—159. doi:10.1364/JOT.76.000158.
23. Eplee Jr. R. E., Meister G., Patt F. S., Barnes R. A., Bailey S. W., Franz B. A., McClain

- C. R. (2012). On-orbit calibration of SeaWiFS. *Appl. Optics*. 2012. 51(36), 8702—8730.
24. *Explanatory supplement to the astronomical almanac*. (1992). Ed. Seidelmann P. K. University Science Books, Mill Valley, California. 752.
25. Galvin R. P. (2009). *Transmissive diffuser with a layer of polytetrafluoroethylene on the output surface for use with an on-orbit radiometric calibration*. USA Patent No. 7482572 B1. Jan. 27.
26. Garoli D., De Marcos L., Larruquert J., Corso A., Zaccaria R., Pelizzo M. (2020). Mirrors for Space Telescopes: Degradation Issues. *Applied. Sci.* 10. 7538.
27. Georgiev G. T., Butler J. J. (2008). BRDF study of gray-scale Spectralon. *Proc. SPIE*. 7081. № 708107.
28. Gérard B., Deuzé J.-L., Herman M., Kaufman Y. J., Lallart P., Oudard C., Remer L. A., Roger B., Six B., Tanre D. (2005). Comparisons between POLDER 2 and MODIS/Terra aerosol retrievals over ocean. *J. Geophys. Res.* 110. D24211. <https://doi.org/10.1029/2005JD006218>.
29. Höpe A. (2014). Diffuse reflectance and transmittance. *Experim. Methods in Phys. Sci.* 46, 179—219. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386022-4.00006-6>.
30. Keski-Kuha R. A., Bowers C. W., Quijada M. A., Heaney J. B., Gallagher B., McKay A., Stevenson I. (2012). James Webb Space Telescope optical telescope element mirror coatings. *Proc. SPIE*. 8442. 84422J.
31. Lei X., Zhu S., Li Z., Hong J., Liu Z., Tao F., Zou P., Song M., Li C. (2020). Integration model of POSP measurement spatial response function. *Opt. Express*. 28(17), 25480—25489. doi:10.1364/OE.393897.PMID:32907068.
32. Milinevsky G., Oberemok Y., Syniavskiy I., Bovchaliuk A., Kolomiets I., Fesianov I., Wang Y. (2019). Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 229(5). 92—105. doi:10.1016/j.jqsrt.2019.03.007.
33. 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. (2016). New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronaut.* 123. 292—300. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00945765/123>.
34. Noble H., Lam W. T., Smith G., McClain S., Chipman R. A. (2007). Polarization scattering from a Spectralon calibration sample. *Proc. SPIE*. 6682. 668219.
35. Pawluczyk R. (1993). Holographic diffusers. *Proc. SPIE*. 2042. 156—169.
36. Peralta R. J., Nardell C., Cairns B., Russell E. E., Travis L. D., Mishchenko M. I., Fafaul B. A., Hooker R. J. (2007). Aerosol polarimetry sensor for the Glory mission. *Proc. SPIE*. 6786, MIPPR 2007: automatic target recognition and image analysis, and multispectral image acquisition, 67865L. doi: 10.1117/12.783307.
37. Persh S., Shaham Y. J., Benami O., Cairns B., Mishchenko M. I., Hein J. D., Fafaul B. A. (2010). Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor. *Proc. SPIE*. 7807. 780703-1 — 780703-12. doi: 10.1117/12.862029.
38. *Reflectance Characteristics of Accurflect™ light reflecting ceramic*. (2010). Accuratus Corporation. URL: <http://accuratus.com>.
39. Scharton T. D. (2002). Vibration and acoustic testing of spacecraft. *Sound and Vibration*. 36(6). 14—18.
40. Shimadzu 2021. (2021). Example of reflectance measurement using integrating sphere: difference of spectra depending on white reference plate. *Shimadzu Excellence in Sci. Appl. News*. № A639. URL: www.shimadzu.com/an/.

41. Soares C., Mikatarian R. (2003). *Understanding and control of external contamination on the international space station*. ESA SP-540 Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, June 16-20. 2003, Noordwijk, The Netherlands. Noordwijk: ESA. September 2003. 189—195.
42. Standish E. M. (1998). *JPL Planetary and lunar ephemerides. DE405/LE405*, JPL IOM 312. F-98-048.
43. Sun J., Xiong X. (2011). Solar and lunar observation planning for Earth-observing sensors. *Proc. SPIE*. 8176. 817610-1 — 817610-10. doi:10.1117/12.897751.
44. Symmons A., Lifshutz M. (2021). *Field guide to infrared optical materials*. Bellingham, Washington: SPIE Press. 212 p. <https://www.spiedigitallibrary.org/ebooks>.
45. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Danylevsky V., Bovchaliuk A., Fesianov I., Milinevsky G., Savenkov S., Yukhymchuk Yu., Sosonkin M., Ivanov Yu. (2021). Aerosol-UA satellite mission for the polarimetric study of aerosols in the atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 267. 107601, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107601>.
46. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Ivanov Yu., Sosonkin M. (2020). Multispectral polarization state analyzer of scanning polarimeter ScanPol. *Int. J. Optics*. ID 1695658. <https://doi.org/10.1155/2020/1695658>.
47. Syniavskiy I., Oberemok Ye., Ivanov Yu., Sosonkin M., Kireyev V., Akinin K. (2021). Scan mirror assembly for the multispectral scanning polarimeter of Aerosol-UA space mission. *Int. J. Optics*. ID 8854505. <https://doi.org/10.1155/2021/8854505>.
48. Tanré D., Kaufman Y. J., Herman M., Mattoo S. (1997). Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.* 102. 16971—88. doi:10.1029/96JD03437.
49. Wadle S., Lakes R. S. (1994). Holographic diffusers: polarization effects. *Opt. Engineering*. 33(4). 1084—1088.
50. Wadle S., Wuest D., Cantalupo J., Lakes R. S. (1994). Holographic diffusers. *Opt. Engineering*. 33(1). 213—218.
51. Wang Z., Xiong X., Fulbright J., Lei N. (2017). VIIRS day/night band radiometric calibration stability monitoring using the Moon. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122. 5616—5624. doi:10.1002/2016JD026372.
52. Wang W., Zhang L.-M., Xu W., Si X.-L., Huang W.-X. (2020). A method for monitoring solar diffuser's bidirectional reflectance distribution function degradation in geostationary orbit. *Eur. J. Remote Sens.* 53(1). 132—144. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1747948>.
53. Weidner V. R. (1983). White opal glass diffuse spectral reflectance standards for the visible spectrum (SRM's 2015 and 2016). National Bureau of Standards Special Publication, 260-82. U.S. Government Printing Office, Washington. 33.
54. Wolf W. L., Zissis G. J. (eds). (1978). *The infrared handbook*. Washington DC. 1765 p.
55. Xiong X., Sun J., Xiong S., Barnes W. L. (2004). Using the Moon for MODIS on-orbit spatial characterization. *Proc. SPIE*. 5234. 480—487. doi:10.1117/12.510570.
56. Xiong X., Butler J. J. (2020). MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. *Remote Sens.* 12. 2523-1 — 2523-23. doi:10.3390/rs12162523.
57. Xiong X., Sun J., Barnes W., Salomonson V., Esposito J., Erives H., Guenther B. (2007). Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Reflective Solar Bands. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 45(4). 879—889. doi:10.1109/TGRS.2006.890567.
58. Xiong X., Sun J., Xiong S., Barnes W. L. (2004). Using the Moon for MODIS on-orbit spatial characterization. *Proc. SPIE*. 5234. 480-7. doi: 10.1117/12.510570.

59. Yang H. C., Yang B. Y., Song M. X., Zou P., Sun X. B., Hong J. (2018). Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter. *Chinese J. Lasers*. 45(11). ID 1110002.

*I. I. Syniavskyi¹, V. O. Danylevsky^{1,2}, Y. A. Oberemok^{1,2}, Y. S. Ivanov¹,
R. S. Osypenko^{1,2}, M. G. Sosonkin¹, G. P. Milinevsky^{1,2,3}, I. V. Fesianov²*

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

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³College of Physics, International Center of Future Science, Jilin University,
Changchun, P. R. China

RADIOMETRIC IN-ORBIT CALIBRATION OF THE AEROSOL-UA MISSION SCANNING POLARIMETER: TECHNIQUE, DESIGN ELEMENTS, ILLUMINATION ANGLES

The method, structure, ideology and orbital conditions of the devices design for radiometric calibration by Sun of the polarimeters in the Earth orbit is considered, as well as the disadvantages and advantages of the elements that are the basis of the calibration unit, and the materials from which these elements are usually made. The illumination configurations of the working element of the calibration unit for the scanning polarimeter (ScanPol) radiometric calibration in different possible ways of construction, in different parts of the orbit on-board the YuzhSat satellite platform are analyzed. The satellite orbit areas are indicated, in which the conditions of illumination of the working element of the unit are optimal in terms of the ratio of the angles of input/observation, and minimization of the light component caused by the reflection of the Earth surface, atmosphere and elements of the ScanPol and satellite structures. The results are necessary for the development of the optimal design of the radiometric calibration unit for the ScanPol polarimeter in-orbit calibration and will allow to provide the necessary radiometric accuracy of the aerosol data and their stability during the space mission Aerosol-UA.

Key words: aerosol, atmosphere, polarimeter, radiometric calibration, satellite platform

Стаття надійшла до редакції 19.08.2022

Після доопрацювання 11.10.2022

Прийнята до друку 12.10.2022