

<https://doi.org/10.15407/knit2020.06.060>

УДК 528.835; 521.9; 535.2

В. О. ДАНИЛЕВСЬКИЙ

старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: vdanylevsky@gmail.com, vdan@observ.univ.kiev.ua

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053

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

КУТОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗСІЮВАННЯ СОНЯЧНОГО СВІТЛА ЗЕМНОЮ АТМОСФЕРОЮ, СПОСТЕРЕЖУВАНІ ПРИЛАДОМ «СКАНПОЛ» ПРОЄКТУ «АЕРОЗОЛЬ-УА»

У статті оцінюються кутові характеристики розсіювання сонячного світла земною атмосферою та параметри об'єму атмосфери й ділянок земної поверхні, спостережуваних приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-УА» для визначення параметрів аерозольних частинок з орбіти штучного супутника Землі. Отримано оцінки діапазону кутів розсіювання у нижній тропосфері, що можуть спостерігатися приладом «СканПол» з сонячно-синхронної приполярної орбіти висотою 705 км і нахилом 98.1° з перетином супутником висхідного вузла на екваторі о 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв місцевого середнього сонячного часу. Оцінки кутів розсіювання отримано при кожній з трьох реалізацій орбіти для ділянок земної поверхні північної півкулі, де зенітна відстань Сонця становить 80° , 50° , та мінімально можлива для кожної реалізації орбіти на дати поблизу літнього і зимового сонцестоянь (21 червня і 21 грудня) та осіннього рівнодення (21 вересня) 2020 р. Діапазон кутів розсіювання обчислено для усього діапазону кутів сканування приладу «СканПол», що становить 110° уздовж підсупутникової траси. Він найбільший при найбільшій з прийнятих тут зенітній відстані Сонця 80° , яка настає у приполярних широтах північної півкулі у період від весняного до осіннього рівнодення, і у середніх широтах протягом іншої частини року, і становить приблизно $51.1^\circ \dots 149.5^\circ$ близько літнього сонцестояння для орбіти з часом проходження супутником висхідного вузла на екваторі ($T_{\text{ВВ}}$) 21 год 30 хв та $41.9^\circ \dots 172.9^\circ$ при $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв. Найменший діапазон кута розсіювання має місце при мінімальних зенітних відстанях Сонця біля дня зимового сонцестояння і становить приблизно $103.2^\circ \dots 142.8^\circ$ та $108.2^\circ \dots 170.4^\circ$ для зазначених $T_{\text{ВВ}}$ відповідно. Для решти зенітних кутів Сонця діапазони кутів розсіювання мають проміжні значення. Зменшення цього діапазону відбувається переважно за рахунок скорочення з боку малих кутів розсіювання. У підсумку діапазон спостережуваних кутів розсіювання найбільший для орбіти з місцевим часом, близьким до полудня, що у випадку орбіти із зазначеним тут нахилом відповідає $T_{\text{ВВ}}$ приблизно від 22 год 30 хв до 24 год 00 хв. Порівняння діапазонів кутів розсіювання, спостережуваних приладом «СканПол», з даними моделювання показало, що вимірювання з приладом «СканПол» на зазначеній орбіті дозволяють визначати мікрофізичні й оптичні характеристики аерозольних частинок. У процесі сканування лінійний розмір уздовж підсупутникової траси ділянки земної поверхні у миттєвому полі зору приладу змінюється приблизно від 6 км у надирі до майже 60 км при найбільшому куті сканування 60° , а унаслідок обертання Землі довгота спостережуваної ділянки при цьому зменшується приблизно на 1.55° , що відповідає її лінійному зміщенню уздовж паралелі від $DS \approx 172$ км на екваторі до $DS \approx 24.5$ км на широті 82° . Тому результати вимірювань з приладом «СканПол» можуть бути використані при їхньому мезомасштабному усередненні.

Ключові слова: земна атмосфера, оптика атмосфери, дистанційні дослідження, аерозолі, розсіювання сонячного світла.

Цитування: Данилевський В. О. Кутові характеристики розсіювання сонячного світла земною атмосферою, спостережувані приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-УА». *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 60–74. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.060>

ВСТУП

Дистанційні дослідження аерозолів у земній атмосфері необхідні для правильного оцінювання їхньої ролі у сучасних кліматичних моделях [7, 14, 27]. Такі оцінки можливі лише за умови, що крім просторово-часового розподілу концентрації аерозольних частинок у атмосфері відомі ще й їхні характеристики, які впливають як на розсіювання та поглинання цими частинками сонячного світла у атмосфері, так і на їхню ефективність як центрів конденсації водяної пари, від чого залежать кількість і властивості хмар. Зокрема, це такі характеристики частинок, як розподіл по розмірах, їхня морфологія, густина, показник заломлення [12, 21, 23, 26]. Оскільки розподіл частинок по розмірах у земній атмосфері, як правило, двомодальний (якщо ігнорувати так звані ядра Ейткена, які дистанційними методами не виявляються) [9], то зазначені характеристики повинні визначатися для кожної моди. Зазначені характеристики аерозольних частинок визначаються з наземних та супутникових дистанційних вимірювань інтенсивності розсіяного земною атмосферою сонячного оптичного випромінювання шляхом розв'язування відповідних рівнянь. Ці рівняння описують кількісно процеси розсіювання світла цими частинками з урахуванням розсіювання на флуктуаціях густини газової атмосфери (релеївське розсіювання) та поглинання її газовими складовими [17]. При цьому алгоритм розв'язування відповідної оберненої задачі повинен обов'язково забезпечувати визначення вмісту й параметрів несферичних частинок, таких як ґрунтовий пил, сажа, частинки біологічного походження і т. п. Їхнє ігнорування може призвести, особливо при супутникових вимірюваннях, до значних похибок інших параметрів аерозольного шару й частинок, таких як аерозольна оптична товщина атмосфери, розподіл частинок за розмірами, показник заломлення [11].

Крім параметрів частинок та оптичних характеристик атмосфери, рівняння для інтенсивності спостережуваного супутниковим приладом світла, відбитого від земної поверхні і розсіяного атмосферою, включають і оптичні характери-

сти земної поверхні у полі зору інструмента. Усе це призводить до того, що відповідна обернена задача часто стає некоректною, тобто число визначуваних параметрів перевищує кількість спостережених даних. Для подолання некоректності задачі істотним є збільшення кількості вимірюваних параметрів спостережуваної ділянки поверхні й атмосфери у полі зору інструмента. Крім того, щоб параметри частинок можна було визначити з достатньою точністю, необхідною для метеорологічних і кліматичних моделей, характеристики інструментів повинні забезпечувати вимірювання інтенсивності і стану поляризації у якомога ширшому спектральному діапазоні. Так, щоб скласти уявлення про хімічний склад аерозольних частинок, комплексний показник заломлення частинок повинен визначатись з вимірювань у спектральному діапазоні $\lambda = 0.4 \dots 2.2$ мкм. Ще однією з вимог до інструментів є їхня здатність вимірювати один і той же об'єм атмосфери з різних напрямків, тобто при різних кутах розсіювання, що збільшує число вимірюваних характеристик розсіяного світла [25].

У роботі [11] виконано детальне моделювання залежностей параметрів потоку випромінювання, розсіяного аерозольними частинками, від характеристик частинок і кута розсіювання. Розглядалися частинки різних розмірів у формі сфери і сфероїдів та їхні суміші. Розподіл по розмірах двомодальний лог-нормальний, у широкому діапазоні розмірів (параметр розміру $2\pi r/\lambda$ змінювався у межах від 0.012 до 625, що відповідає радіусам частинок $r \approx 0.001$ мкм при довжині світлової хвилі $\lambda = 0.44$ мкм і $r \approx 0.002$ мкм при $\lambda = 1.02$ мкм, та $r \approx 44$ мкм при довжині світлової хвилі $\lambda = 0.44$ мкм і $r \approx 100$ мкм при $\lambda = 1.02$ мкм відповідно). Мінімум розподілу був приблизно при 0.4...0.5 мкм. Моделювання виконувалось для частинок з дійсною частиною показника заломлення $n = 1.33 \dots 1.6$ та уявною $i = 0.0005 \dots 0.5$. З аналізу результатів моделювання випливає, що для визначення параметрів аерозольних частинок (розподіл по розмірах, форми, показника заломлення) необхідно вимірювати інтенсивність і ступінь поляризації розсіяного земною атмосферою сонячного світла у щонайширшому діапазоні кутів розсіювання, бажано від 0

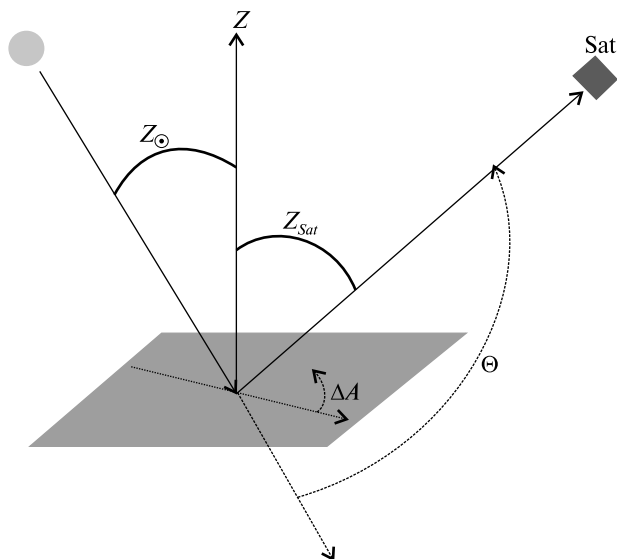


Рис. 1. Кути між напрямками прямого й розсіяного пучків сонячного світла у земній атмосфері: Z_{\odot} , Z_{Sat} — зенітна відстань Сонця й супутника відповідно у спостережуваній точці, ΔA — різниця азимутів відповідних векторів, Θ — кут розсіювання сонячного світла у бік супутника відносно напрямку поширення світлового пучка

до 180° . Зокрема, ступінь лінійної поляризації світла, розсіяного частинками ґрунтового пилу, буде найвищим у діапазоні кутів розсіювання від 30° до 160° , тоді як у випадку дрібних сферичних частинок цей параметр помітно змінюється залежно від показника заломлення у всьому діапазоні від 0 до 180° . Також фазова функція істотно залежить від показника заломлення для дрібнодисперсних частинок і крупнодисперсних сфер і сфероїдів у всьому діапазоні кутів розсіювання. З цих причин, зокрема, вимога до вимірювань інтенсивності і ступеня поляризації розсіяного у земній атмосфері світла у щонайширшому інтервалі кутів розсіювання, ставилася і до приладу APS місії NASA Glory [25].

Створювані спектрополяриметри «СканПол» і МСПП космічного проекту «Аерозоль-UA» відповідають зазначеним вище вимогам, оскільки будуть забезпечувати одночасні вимірювання інтенсивності та ступеня лінійної поляризації розсіяного земною поверхнею і атмосферою сонячного світла у діапазоні спектру $\lambda = 0.37 \dots 2.2$ мкм у діапазоні кутів спостереження 110° [24]. Метою цієї статті є оцінити ефективність таких широко-

кутних вимірювань для визначення параметрів аерозольних частинок у залежності від кута спостережень з орбіти ШСЗ.

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕНЬ КУТІВ РОЗСІЮВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДУ «СКАНПОЛ»

Кут розсіювання у дистанційних дослідженнях земної атмосфери відраховується від напрямку поширення пучка сонячного випромінювання (рис. 1) [20]. У нашому випадку, тобто при спостереженні з супутника, цей кут обчислюється за формулою

$$\Theta = \pi - \arccos[\cos Z_{\odot} \cdot \cos Z_{Sat} + \sin Z_{\odot} \cdot \sin Z_{Sat} \cdot \cos(\Delta A)].$$

Позначення параметрів цієї формули зрозуміле з рис. 1. Вираз у квадратних дужках дорівнює косинусові кута між напрямками на Сонце та на супутник з точки у атмосфері або на земній поверхні, у якій відбувається розсіювання світла (див. наприклад у [2]). Зенітний кут Сонця Z_{\odot} для зазначеної точки, де відбувається розсіювання світла, обчислюється за відомою зі сферичної астрономії формулою:

$$\cos Z_{\odot} = \sin \phi \cdot \sin \delta_{\odot} + \cos \phi \cdot \cos \delta_{\odot} \cdot \cos T_{\odot},$$

де ϕ — широта зазначеної точки на земній поверхні чи у атмосфері над земною поверхнею, δ_{\odot} і T_{\odot} — відповідно топоцентричні схилення та часовий кут Сонця на момент вимірювань.

Топоцентричні (тобто визначені з урахуванням добового паралаксу небесного світила для спостерігача на поверхні земного еліпсоїда або на відомій висоті над нею) координати Сонця обчислюються для спостережуваної приладом «СканПол» на земній поверхні або в атмосфері ділянки з відомими геоцентричними координатами (широта, довгота і геоцентричний радіус-вектор). У цій роботі топоцентричні координати Сонця обчислюються за його геоцентричними координатами, обчисленими на основі фундаментальних ефемерид DE405/LE405 [13, 28] приблизно на момент проходження супутником нисхідного вузла його орбіти на земному екваторі (тобто на денній частині орбіти) у шкалі середнього сонячного часу гринвіцького меридіану (ССЧ ГМ). Обчислення цих координат виконуються за формулами, відомими з ефемерид-

ної астрономії та астрометрії з використанням фундаментальних астрономічних сталих Міжнародного астрономічного союзу (МАС) 1976 і 1979 рр. [1, 3, 13]. Оскільки, як показали дослідження розподілу з висотою аерозолів у земній атмосфері, основна їхня маса зосереджена у нижній частині тропосфери, до висоти 5-6 км [15, 19, 30], то у цій роботі топоцентричні координати спостережуваного приладом «СканПол» об'єму атмосфери обчислюються як для поверхні земного еліпсоїда.

Геоцентричні координати спостережуваного приладом «СканПол» об'єму атмосфери та ділянки на земній поверхні обчислюються для положень супутника на коловій сонячно-синхронній орбіті з висотою 705 км і відповідним періодом 98.7 хв, обчисленим за 3-м законом Кеплера, при нахилі орбіти 98.1° . Наземна траса такої орбіти, де для визначеності довгота висхідного вузла на земному екваторі становить 200° на схід від гринвіцького меридіана (або ж -160° на захід від нього), показана на рис. 2. Геоцентричні ж координати супутника (широта й довгота при зазначеній висоті над земною поверхнею) обчислюються за формулами сферичної тригонометрії уздовж його орбіти із заданим інтервалом часу за відомою швидкістю руху супутника по такій орбіті. Для цього спочатку за відомою геоцентричною кутовою швидкістю супутника обчислюється довжина дуги орбіти на кожен момент часу відносно її висхідного вузла на екваторі, і потім, за відомим нахилом орбіти та довготою висхідного вузла обчислюються відповідні довгота й широта супутника з урахуванням швидкості обертання Землі. При цьому використано параметри фігури Землі (земного еліпсоїда) згідно з системою фундаментальних астрономічних сталих МАС 1976 р. і 1979 р. Прецесією орбіти супутника за рахунок несферичності Землі тут знехтувано, оскільки при зазначеному нахилі 98.1° вона не перевищує 1° за добу [8].

Схема сканування земної поверхні й атмосфери приладом «СканПол» показана на рис. 3. Координати спостережуваної приладом «СканПол» ділянки на наземній підсупутниковій трасі визначаються відносно геоцентричних координат супутника з плоского трикутника SOP для

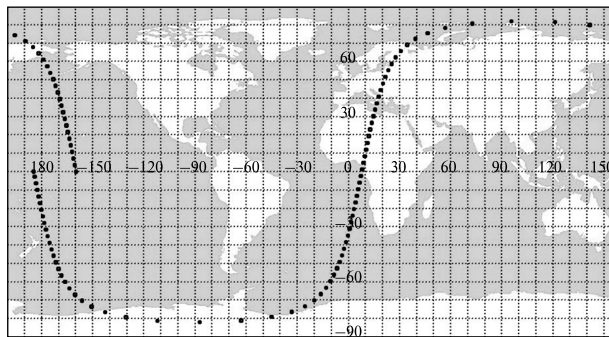


Рис. 2. Траса супутника з приладами «Аерозоль-УА» на земній поверхні (між точками — інтервал 1 хв)

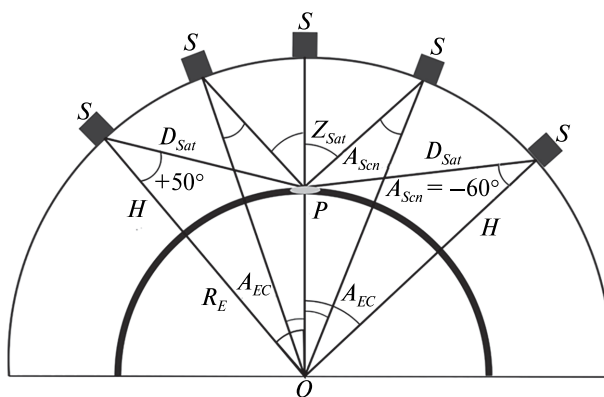


Рис. 3. Схема сканування приладом «СканПол» спостережуваної ділянки P на земній поверхні у площині орбіти супутника: O — центр земної сфери, S — положення супутника в орбіті на відповідний момент часу, R_E — середній радіус Землі, H — висота орбіти супутника над земною поверхнею, A_{EC} — кут при центрі земної сфери між послідовними радіусами-векторами супутника та спостережуваної точки, D_{Sat} — відстань між супутником і спостережуваною точкою поблизу земної поверхні для відповідного кута сканування (положення супутника в орбіті), A_{Scn} — кут сканування відносно надиря, Z_{Sat} — зенітна відстань супутника відносно спостережуваної точки для відповідного кута сканування

відомого кута сканування $A_{Scn} = \angle(OSP)$ уперед у напрямку руху супутника і назад у площині орбіти. Земля тут вважається сферичною з радіусом $R_E = 6371$ км, а висота орбіти $H = 705$ км, як зазначено вище. Із зазначеного трикутника визначається кут A_{EC} при центрі Землі, тобто кутова відстань уздовж підсупутникової траси між положеннями підсупутникової точки та спостережуваної ділянки. Значення кута A_{Scn} дорівнює

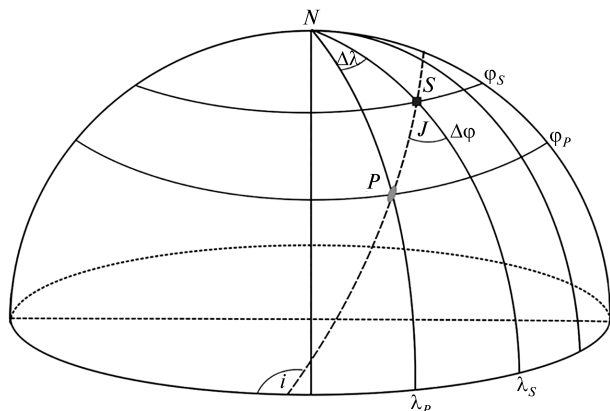


Рис. 4. Положення спостережуваної ділянки P відносно підсупутникової точки S уздовж траси супутника: i — кут нахилу орбіти супутника до екватора, J — кут між площинами орбіти і меридіана супутника, $\Delta\lambda$, $\Delta\varphi$ — різниця довгот і широт підсупутникової точки і спостережуваної ділянки

50° при першому потраплянні спостережуваної ділянки у поле зору «СканПол», і -60° — при останньому [4, 5, 24].

Потім, за відомих нахилу орбіти супутника до земного екватора i , широти й довготи супутника (точніше — підсупутникової точки), за відомими формулами сферичної тригонометрії для прямокутного трикутника обчислюються координати спостережуваної точки P на земній поверхні (рис. 4). Наприклад, використовуючи формулу синусів:

$$\sin(\varphi_S - \varphi_P) = \sin(S \cup P) \cdot \sin(\pi - i),$$

і формулу косинусів:

$$\cos(\lambda_S - \lambda_P) = \frac{\cos(S \cup P)}{\cos(\varphi_S - \varphi_P)},$$

де кутова довжина дуги $S \cup P = A_{EC}$.

Для обчислень зенітного кута супутника відносно спостережуваної ділянки у нашому випадку використовуються співвідношення, що одержуються з плоских трикутників, які з'єднують цю ділянку, центр Землі і супутник (рис. 3) на кожен момент вимірювань:

$$Z_{Sat} = \angle OSP + A_{EC},$$

оскільки центр спостережуваної ділянки лежить у площині орбіти супутника. З цієї ж причини азимуту супутника для спостережуваної ділян-

ки збігаються з азимутальним кутом підсупутникової траси, що проходить через цю ділянку. Тобто, азимут супутника дорівнюватиме кутові J між підсупутниковою трасою та меридіаном у спостережуваній ділянці (рис. 4), який обчислюється за очевидною простою формулою: $\sin J = \cos i / \cos \varphi_P$ [8], і змінюється на 180° при проходженні супутником зеніта.

Вимірювання хронометруються у шкалі UTC для гринвіцького меридіана, моменти часу кожного вимірювання вибраної спостережуваної ділянки відраховуються від моменту першого потрапляння її у поле зору «СканПол», а інтервал між вимірюваннями дорівнює періодові обертання системи сканувальних дзеркал приладу, що становить приблизно 1.5 с [4, 24], з доданком Δt для врахування «довороту» сканувальної системи до напрямку на спостережувану ділянку унаслідок зміщення супутника за зазначений проміжок часу. Максимальна величина Δt цього доданка становить приблизно 0.5 с для останнього вимірювання (при куті сканування -60°). Оскільки кутова довжина при центрі Землі відрізка орбіти супутника, що відповідає діапазонам кутів сканування 110° , становить приблизно 22.5° , а кутова швидкість руху супутника по орбіті становить приблизно 3.65 хв $^{-1}$, то тривалість усього циклу сканування становить приблизно 6.2 хв. За цей час при зазначеній швидкості обертання системи сканувальних дзеркал приладом «СканПол» з урахуванням руху супутника може бути зроблено не більше як 215 вимірювань під різними кутами параметрів світла, розсіяного однією спостережуваною ділянкою атмосфери й поверхні за умови, що вимірювання будуть виконуватись у кожен момент, коли спостережувана точка буде потрапляти у центр миттєвого поля зору приладу. Однак насправді число таких вимірювань буде залежати від узгодженості інтервалів між вимірюваннями і швидкостями обертання сканувальних дзеркал та руху супутника. Тому можливо, що на момент вимірювань потрібний об'єм атмосфери та поверхня не зможуть хоча б частково потрапити у поле зору приладу, тобто вимірювання зазначеної точки будуть виконані не при кожному повороті сканувальних дзеркал. Відповідно і кількість кутів,

під якими ця ділянка спостерігатиметься, буде меншою, ніж наведена вище оцінка.

Кут розсіювання сонячного світла у спостережуваному об'ємі атмосфери при будь-якому положенні супутника на підсонячній частині орбіти залежить від зенітної відстані Сонця на час вимірювань. У свою чергу, діапазон зміни зенітного кута Сонця при русі супутника по орбіті залежить від часу проходження ним земного екватора. Тому тут одержані оцінки діапазонів спостережуваного приладом «СканПол» кута розсіювання для певних положень супутника на зазначеній орбіті з різним часом проходження супутником екватора. Слід зазначити, що практично усі прилади для досліджень аерозолів у земній атмосфері, як ті, що виконують вимірювання (наприклад MODIS/Terra MODIS/Aqua, CALIOP та інші), так і майбутні, встановлюються на супутниках, що рухаються по сонячно-синхронних приполярних орбітах з нахилом приблизно 98° і висотами приблизно від 500 до 850 км [10]. При цьому, як правило, момент проходження екватора на освітленій ділянці орбіти вибирається або приблизно між 9:30 і 11:30 місцевого сонячного часу (дополудневі орбіти), або ж між 13:00 та 13:30 (післяполудневі орбіти). Площини цих орбіт мають сталу орієнтацію відносно напрямку на Сонце, і супутник перетинає екватор чи паралель будь-якої широти у один і той же місцевий сонячний час [8], а тому діапазон зміни зенітної відстані Сонця відносно спостережуваних точок на земній поверхні або ж у приземній атмосфері, і діапазони спостережуваних кутів розсіювання одні й ті ж при кожному витку. У нашому випадку розглядалася зазначена вище сонячно-синхронна приполярна орбіта з моментами проходження висхідного вузла на 200° східної довготи о 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв гринвіцького середнього сонячного часу, що відповідає місцевому середньому сонячному часові для приблизно 8° східної довготи 9 год 30 хв, 10 год 30 хв і 11 год 30 хв відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ І АНАЛІЗ

У роботі оцінювались діапазони кутів розсіювання для трьох зенітних відстаней Сонця відносно спостережуваного приладом «СканПол»

об'єму приземної атмосфери у випадку кожної із зазначених орбіт, а саме, 80° , 50° , і для мінімальної зенітної відстані Сонця, яка може бути на кожній з орбіт. Вибір зазначених зенітних кутів Сонця загалом довільний, зроблений з метою оцінювання обставин вимірювань у різних широтних зонах. Максимальний зенітний кут Сонця 80° вибрано за аналогією з процедурою вимірювань у наземній мережі сонячних фотометрів AERONET [16, 18], де це обмеження введене з метою уникнення впливу хмарності. Очевидно, що мінімальна зенітна відстань Сонця відповідає мінімальному діапазону кутів розсіювання, що теж є важливим обмеженням ефективності досліджень. Обчислення виконано для частини орбіти над північною півкулею, оскільки ця частина земної кулі становить інтерес з точки зору оцінки вмісту й характеристик аерозолів антропогенного походження. Координати спостережуваної ділянки у кожному випадку залежать також від сезону, тому тут обчислення виконано приблизно на дати сонцестоянь і осіннього рівнодення 2020 р. Кути розсіювання обчислювались для кожної із зазначених вище спостережуваних ділянок на кожен з моментів вимірювань приладом «СканПол» із зазначеним вище кроком приблизно $1.5 \text{ c} + \Delta t$ у всьому діапазоні кутів сканування A_{Scn} (рис. 3). Крім того, щоб скласти уявлення про зміни параметрів спостережуваного об'єму земної атмосфери і ділянки на земній поверхні унаслідок руху супутника й обертання Землі, обчислювались також розміри ділянки на земній поверхні з урахуванням її кривини, що відповідають миттєвому розміру поля зору «СканПол» (0.5° [4, 24]) уздовж підсупутникової траси, та зміщення земної поверхні уздовж паралелі на схід протягом повного циклу сканування зазначеної спостережуваної ділянки, що триває приблизно 6 хв. Отже, тут поняття «спостережувана ділянка» досить умовне, і означає лише миттєве положення центра поля зору приладу, при цьому хоча широта цієї ділянки зберігається, довгота неперервно зменшується. Узагальнені результати обчислень наведено у таблиці. Тут для зазначених моментів часу й ділянок земної поверхні у полі зору приладу наведено мінімальне і максимальне значення кута розсіювання для

Діапазони кутів розсіювання та параметри спостережуваної приладом «СканПол» ділянки земної поверхні

Параметри	Значення параметрів		
	$T_{\text{ВВ}} = 21 \text{ год } 30 \text{ хв}$	$T_{\text{ВВ}} = 22 \text{ год } 30 \text{ хв}$	$T_{\text{ВВ}} = 23 \text{ год } 30 \text{ хв}$
21 червня 2020 р.			
Z_{\odot}	30.5°	17.5°	5.0°
A_{\odot}	107.0°	105.4°	135.6°
φ_P	36.8°	29.4°	27.0°
λ_P	16.9°	14.8°	14.2°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	107.1°...149.7°	107.0°...162.6°	108.9°...176.0°
A_{Scn}	-60.0°...-3.2°	-60.0°...-1.3°	-60.0°...-2.3°
Z_{Sat}	74.1°...3.5°	74.0°...1.4°	74.0°...2.5°
A_{Sat}	190.1°...190.1°	189.3°...189.3°	189.1°... 189.1°
ΔL , км	56.9...6.2	56.9...6.2	56.9...6.2
ΔS , км	137.2...53.0	149.4...56.4	152.6...58.3
Z_{\odot}	50.0°	50.0°	50.0°
A_{\odot}	167.8°	186.4°	202.4°
φ_P	73.1°	73.3°	72.3°
λ_P	41.3°	41.7°	39.8°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	81.2°...149.7°	74.8°...162.6°	71.9°...176.0°
A_{Scn}	50.0°...-37.2°	50.0°...-41.5°	50.0°...-43.4°
Z_{Sat}	58.3°...42.2°	58.3°...47.3°	58.3°...49.7°
A_{Sat}	29.0°...209.0°	29.4°...209.4°	27.6°... 207.6°
ΔL , км	19.9...10.7	19.9...12.7	19.9...13.8
ΔS , км	0.0...29.6	0.0...31.2	0.0...34.1
Z_{\odot}	80.0°	80.0°	80.0°
A_{\odot}	308.1°	316.6°	326.0°
φ_P	67.0°	71.0°	73.6°
λ_P	176.3°	171.1°	166.5°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	51.1°...149.5°	45.0°...161.8°	41.9°...172.9°
A_{Scn}	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°
Z_{Sat}	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°
A_{Sat}	158.9°...338.9°	154.3°...334.3°	150.1°... 330.1°
ΔL , км	19.9...56.9	19.9...56.9	19.9...56.9
ΔS , км	0.0...67.0	0.0...55.7	0.0...48.4
21 вересня 2020 р.			
Z_{\odot}	35.5°	21.0°	6.0°
A_{\odot}	103.6	110.4°	118.3°
φ_P	10.1°	8.1°	3.3°
λ_P	10.3°	9.9°	8.9°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	106.0°...144.7°	109.2°...159.5°	107.9°...174.4°
A_{Scn}	-60.0°...-3.2°	-60.0°...-4.1°	-60.0°...-2.2°
Z_{Sat}	74.0°...3.5°	74.0°...4.5°	74.0°...2.5°
A_{Sat}	188.2°...188.2°	188.2°...188.2°	188.1°... 188.1°

Продовження таблиці

Параметри	Значення параметрів		
	$T_{ВВ} = 21$ год 30 хв	$T_{ВВ} = 22$ год 30 хв	$T_{ВВ} = 23$ год 30 хв
ΔL , км	56.9...6.2	56.9...6.2	56.9...6.2
ΔS , км	168.7...65.2	169.7...66.3	171.1...65.3
Z_{\odot}	50.0°	50.0°	50.0°
A_{\odot}	142.2°	165.3°	185.4°
φ_P	43.8°	49.5°	50.3°
λ_P	19.1°	21.2°	21.6°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	84.9°...144.7°	76.0°...159.5°	72.0°...174.4°
A_{Scn}	50.0°...-33.5°	50.0°...-41.0°	50.0°...-43.4°
Z_{Sat}	58.3°...37.9°	58.3°...46.7°	58.3°...49.7°
A_{Sat}	11.3°...191.3°	12.5°...192.5°	12.7°... 192.7°
ΔL , км	19.9...9.6	19.9...12.4	19.9...13.8
ΔS , км	0.0...69.7	0.0...69.9	0.0...71.6
Z_{\odot}	80.0°	80.0°	80.0°
A_{\odot}	197.8°	208.0°	217.0°
φ_P	79.9°	79.2°	78.0°
λ_P	67.3°	62.1°	55.8°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	54.1°...144.5°	46.2°...158.9°	42.1°...171.9°
A_{Scn}	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°
Z_{Sat}	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°
A_{Sat}	53.7°...233.7°	48.8°...228.8°	42.7°... 222.7°
ΔL , км	19.9...56.9	19.9...56.9	19.9...56.9
ΔS , км	0.0...30.0	0.0...32.2	0.0...35.6
21 грудня 2020 р.			
Z_{\odot}	37.2°	24.0°	10.0°
A_{\odot}	99.8°	110.4°	113.4°
φ_P	-22.3°	-16.7°	-19.8°
λ_P	3.3°	4.6°	3.9°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	103.2°...142.8°	109.4°...156.6°	108.2°...170.4°
A_{Scn}	-60.0°...-0.4°	-60.0°...-5.0°	-60.0°...-2.2°
Z_{Sat}	74.0°...0.4°	74.0°...5.6°	74.0°...2.5°
A_{Sat}	188.8°...188.8°	188.5°...188.5°	188.6°... 188.6°
ΔL , км	56.9...6.2	56.9...6.2	56.9...6.2
ΔS , км	158.5...59.1	164.2...65.0	161.3...61.6
Z_{\odot}	50.0°	50.0°	50.0°
A_{\odot}	136.1	157.5°	176.4°
φ_P	12.6°	23.1°	26.4°
λ_P	10.9°	13.3°	14.1°
$\Theta_{\min} \dots \Theta_{\max}$	86.5°...142.8°	77.4°...156.6°	72.7°...170.4°
A_{Scn}	50.0°...-32.2°	50.0°...-39.9°	50.0°...-42.9°
Z_{Sat}	58.3°...36.3°	58.3°...45.5°	58.3°...49.1°

Параметри	Значення параметрів		
	$T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв	$T_{\text{ВВ}} = 22$ год 30 хв	$T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв
A_{Sat}	8.3°...188.3°	8.8°...188.8°	9.1°...189.1°
ΔL , км	19.9...9.2	19.9...11.9	19.9...13.5
ΔS , км	0.0...92.6	0.0...97.5	0.0...99.6
Z_{\odot}	80.0°	80.0°	80.0°
A_{\odot}	155.8°	170.8°	185.0°
φ_p	53.3°	56.1°	56.4°
λ_p	22.9°	24.3°	24.5°
$\Theta_{\text{min}} \dots \Theta_{\text{max}}$	55.2°...142.7°	47.6°...156.1°	42.8°...168.8°
A_{Scn}	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°	50.0°...-60.0°
Z_{Sat}	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°	58.3°...74.0°
A_{Sat}	13.6°...193.6°	14.6°...194.6°	14.8°...194.8°
ΔL , км	19.9...56.9	19.9...56.9	19.9...56.9
ΔS , км	0.0...102.5	0.0...95.7	0.0...94.8

Позначення. $T_{\text{ВВ}}$ — місцевий середній сонячний час проходження супутником висхідного вузла орбіти на екваторі, Z_{\odot} , A_{\odot} — зенітна відстань і азимут Сонця у спостережуваній приладом «СканПол» ділянці земної поверхні, що відраховується від місцевого напрямку на північ через схід, φ_p — широта спостережуваної ділянки, λ_p — початкова довгота спостережуваної ділянки, тобто миттєвого положення центра поля зору «СканПол» при першому спостереженні приладом цієї ділянки, Θ_{min} , Θ_{max} — мінімальне і максимальне значення кута розсіювання у спостережуваній ділянці земної поверхні для усього діапазону кута сканування, що відраховується від напрямку у надир в діапазоні від +50° (уперед) до -60° (назад), A_{Scn} , Z_{Sat} , A_{Sat} , ΔL та ΔS — відповідні до Θ_{min} , Θ_{max} значення кута сканування, зенітні відстані та азимуту супутника для спостережуваної приладом «СканПол» ділянки земної поверхні (азимут відраховується від місцевого напрямку на північ через схід), довжина дуги на земній поверхні (уздовж підсупутникової траси, що відповідає миттєвому полю зору «СканПол») та зміщення спостережуваної ділянки на земній поверхні (уздовж паралелі відносно підсупутникової траси протягом часу сканування від кута +50°).

усього діапазону кута сканування і відповідні їм значення кута сканування та зенітні відстані й азимуту Сонця й супутника відносно спостережуваної ділянки. Заради наочності діапазон і характер змін кутів розсіювання у процесі сканування для кожного із зазначених випадків показано на рис. 5.

Як і слід очікувати, граничні широти спостережуваної приладом «СканПол» частини атмосфери й земної поверхні змінюються протягом року унаслідок зміни схилення Сонця. У період від весняного до осіннього рівнодення більшість вимірювань буде виконано над північною півкулею, тоді як у іншу частину року — над південною. При цьому діапазон широт спостережуваних приладом «СканПол» ділянок буде дещо різним для орбіт з різним часом проходження

вузла орбіти. Як видно із таблиці, близько дня літнього сонцестояння спостережувані ділянки на земній поверхні, для яких зенітні кути Сонця для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв змінюються від 80° (максимальне прийняте тут значення Z_{\odot}) до приблизно 30.5° (мінімальне значення Z_{\odot} для орбіти із зазначеним $T_{\text{ВВ}}$), розташовані на широтах від 81.9° Пн (найвища широта точки на підсупутникової трасі для орбіти з нахилом 98.1°), до приблизно 36.8° Пн, тоді як довготи будуть у діапазоні від 176.3° до 16.9° відповідно. Для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв у цей же день зенітні кути Сонця змінюватимуться від 80° до 5°, зазначені широти будуть у діапазоні від 81.9° до приблизно 27° на північ від екватора, а довготи — відповідно від 166.5° до 14.2°. Поблизу рівнодень для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв цей діапазон широт

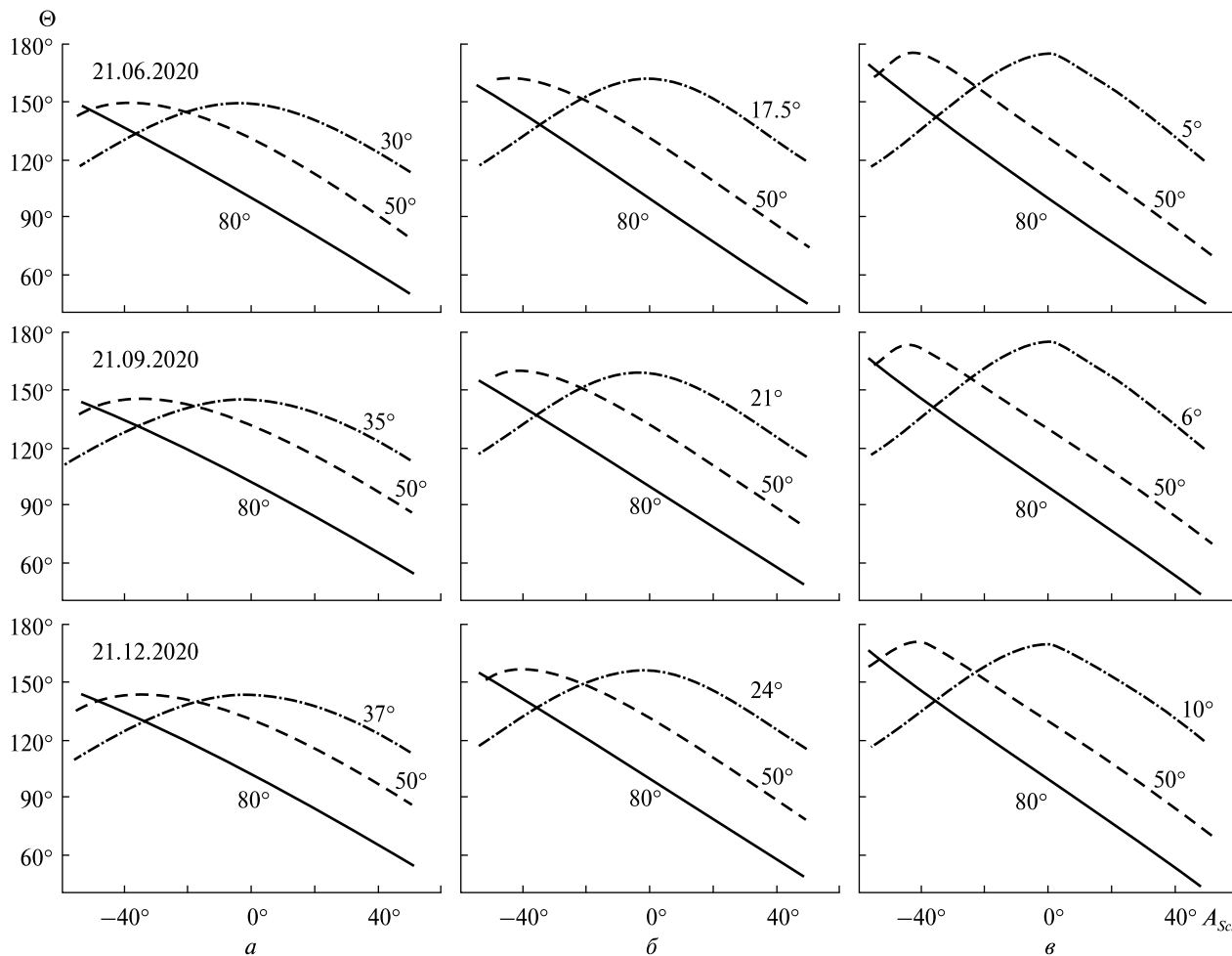


Рис. 5. Зміни кутів розсіювання Θ у процесі сканування приладом «СканПол» уздовж підсупутникової траси у різні сезони та при різних значеннях зенітної відстані Сонця Z_{\odot} (числа біля кривих): *a* — $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв, *б* — $T_{\text{ВВ}} = 22$ год 30 хв, *в* — $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв

становитиме приблизно від 80° Пн до 10° Пн (при мінімальному $Z_{\odot} \approx 35.5^{\circ}$), діапазон довгот — від 67.3° до 10.3° , а для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв — приблизно від 78° Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 3.3° Пн (при мінімальному $Z_{\odot} \approx 6^{\circ}$) при довготах 55.8° та 8.9° відповідно. Поблизу дня зимового сонцестояння для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв спостерігатимуться ділянки у діапазоні широт від 55.3° Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 22.3° Пд ($Z_{\odot} = 37.2^{\circ}$) з довготами від 22.9° до 3.3° , для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв широти становитимуть від 56.4° Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 19.8° Пд ($Z_{\odot} = 10^{\circ}$), і відповідні широти — від 24.5° до 3.9° . Отже, діапазон широт спостережуваних ділянок буде найширший для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв,

а спостережувані ділянки для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 22$ год 30 хв будуть розташовуватись у межах зазначених вище діапазонів (див. табл.).

Діапазон спостережуваних кутів розсіювання визначається зенітними відстанями Сонця й супутника для спостережуваної ділянки атмосфери й земної поверхні на час вимірювань, і тому також залежить від $T_{\text{ВВ}}$ супутника. З аналізу наведених у таблиці значень Z_{\odot} на відповідні дати впливають такі закономірності змін діапазонів кутів розсіювання. Перш за все очевидно, що для усіх розглянутих тут $T_{\text{ВВ}}$ і дат діапазон кутів розсіювання найбільший при великих зенітних відстанях Сонця, і найменший — при мінімаль-

них, і це зменшення відбувається нелінійно за рахунок малих кутів розсіювання. Так, для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв на 21 червня Θ змінюється у межах приблизно від 51° до 149.5° при $Z_\odot = 80^\circ$ та від 107° до 149.7° — при мінімальному значенні $Z_\odot = 30.5^\circ$, і мінімальний кут розсіювання при цьому зростає більш як удвічі, тоді як максимальний практично не змінюється. Для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв при зміні зенітного кута Сонця від $Z_\odot = 80^\circ$ до мінімального $Z_\odot = 5^\circ$ діапазон кута розсіювання змінюється від $\Theta \approx 42^\circ \dots 173^\circ$ до $\Theta \approx 109^\circ \dots 176^\circ$. Ці закономірності у змінах Θ для зазначених діапазонів зенітних кутів Сонця зберігаються протягом усього року, і діапазони кутів розсіювання поблизу літнього сонцестояння для північної півкулі на кілька градусів більші, ніж поблизу зимового. Крім того, діапазони кутів розсіювання для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв у всіх розглядуваних тут випадках найбільші (див. таблицю і рис. 5). З наведених результатів випливає, зокрема, що у найбільших діапазонах кутів розсіювання сонячного світла поверхнею й атмосферою Землі вимірювання приладом «СканПол» будуть виконуватись переважно у зонах високих і помірних широт (приблизно 53° Пн... 82° Пн).

Важливою обставиною є співвідношення між діапазонами кутів розсіювання вимірюваних приладом «СканПол» потоків сонячного світла і розсіювальними характеристиками аерозольних частинок, фізичні властивості яких визначаються шляхом розв'язування відповідної оберненої задачі. Як впливає з результатів моделювання кутового розподілу інтенсивності та стану поляризації випромінювання, розсіяного аерозольними частинками [11], фазова функція та ступінь поляризації світла, розсіяного частинками різної форми і розмірів, проявляють найбільшу чутливість до значення комплексного показника заломлення у діапазоні кутів розсіювання приблизно $40^\circ \dots 180^\circ$, причому ця чутливість більша при більших кутах розсіювання. Це означає, що загалом прилад «СканПол» на зазначеній вище орбіті буде здійснювати вимірювання у діапазоні кутів розсіювання сонячного світла земною атмосферою та поверхнею, які забезпечують можливості для визначення

оптичних і мікрофізичних характеристик аерозольних частинок. Але при цьому перевагу має орбіта з часом проходження висхідного вузла, близьким до місцевої півночі для заданої його довготи (відповідно час проходження нисхідного вузла буде близьким до місцевого полудня), оскільки у цьому випадку діапазон кутів розсіювання буде найбільшим.

Проте у таблиці наведено й інші параметри, що характеризують умови вимірювань приладом «СканПол» розсіяного світла. Широта і довгота спостережуваної ділянки дають уявлення про її географічне розташування для оцінювання найімовірнішого типу аерозольних частинок. Кут сканування A_{Scn} показує, під яким кутом відносно надирі спостерігається ділянка атмосфери й земної поверхні, що необхідно для оцінювання потоку світла на вхідній апертурі приладу. Окремо варто розглянути зміни лінійних розмірів ΔL спостережуваної ділянки земної поверхні та приземної атмосфери уздовж підсупутникової траси (тобто у напрямку сканування) з перебігом сканування та її зміщення уздовж паралелі унаслідок обертання Землі (тобто зміна довготи) ΔS . При кутовому діаметрі поля зору телескопів «СканПол» 0.5° [4, 24] довжина ділянки земної поверхні уздовж підсупутникової траси у надирі становить $\Delta L \approx 6$ км, але при куті сканування $A_{\text{Scn}} = 50^\circ$ $\Delta L \approx 20$ км, а при $A_{\text{Scn}} = -60^\circ$ $\Delta L \approx 57$ км (таблиця) з урахуванням кривини земної поверхні. При цьому потрібно ще враховувати й значну швидкість переміщення спостережуваної поверхні у полі зору «СканПол», пов'язану з обертанням сканувальних дзеркал та часом експонування приладом вхідного потоку світла. Нескладно оцінити, що при зазначеному періоді обертання 1.5 с за час експонування 1 мс напрямком миттєвого поля зору приладу «СканПол» зміститься приблизно на 0.24° , тобто майже на половину номінальної роздільної здатності приладу. Тому насправді до наведених у таблиці значень ΔL потрібно ще додати й величину, відповідну до часу експонування. У випадку 1 мс величина ΔL збільшиться майже у півтора рази, причому вона практично не буде скомпенсована переміщенням підсупутникової точки зі швидкістю 6.8 км/с у протилежному напрямку.

Крім того, оскільки сканування однієї ділянки у всьому діапазоні кутів 110° триває приблизно 6 хв, то за цей час її довгота зміниться приблизно на 1.55° , що відповідає зміщенню земної поверхні уздовж паралелі: на екваторі $\Delta S \approx 172$ км, тоді як у полярних широтах — значно менше, наприклад $\Delta S \approx 24.5$ км при $\varphi = 82^\circ$. Це означає, що справжня просторова роздільна здатність приладу «СканПол» істотно змінюється залежно від кута сканування та від широти спостережуваних ділянок на земній поверхні і у атмосфері. Як показують дослідження за допомогою наземних дистанційних засобів, таких як сонячні фотометри мережі AERONET та лідари, вміст і характеристики аерозольних частинок над місцем спостережень не змінюються істотно протягом кількох десятків хвилин, а діаметр атмосферного стовпа, у якому усереднюються дані сонячних фотометрів, становить 5...10 км протягом дня, залежно від розподілу аерозолів з висотою [16, 18]. Але під час так званих «особливих подій», пов'язаних або зі значним надходженням аерозолів у атмосферу поблизу місця спостережень, або з перенесенням його з віддалених регіонів атмосферними потоками, вміст частинок над місцем спостережень змінюється доволі швидко (менш ніж за годину) у кілька разів, що свідчить про значну просторову неоднорідність концентрації частинок у атмосфері [15]. З огляду на значну кількість і різноманітність джерел надходження аерозольних частинок у атмосферу та механізмів видалення і пов'язану з цим різноманітність їхніх фізичних параметрів і оптичних характеристик [7, 14, 27], є підстави очікувати значної неоднорідності у просторово-часовому розподілі частинок як за концентрацією, так і за характеристиками. Спеціальні дослідження мезомасштабних просторово-часових неоднорідностей у розподілі аерозолів, виконані за допомогою різноманітних засобів (наземні станції з нефелометрами, лідар супутникового базування, нефелометр на літаку) у різних регіонах земної кулі [6] також показали, що вміст і параметри аерозолів можуть змінюватися у широкому діапазоні: від кількох кілометрів до приблизно 200 км. З іншого боку, обмеженість просторової роздільної здатності супутникових

приладів для дослідження аерозолів та вплив інших супутніх чинників (характеристики земної поверхні, хмарність) теж накладають обмеження на детальність досліджень просторово-часової динаміки аерозолів. Так, номінальна просторова роздільна здатність даних вимірювань з приладом MODIS, ряди яких охоплюють проміжок часу більш як 15 років і є одним з найповніших джерел даних про розподіл аерозолів у атмосфері у глобальному масштабі, становить 10×10 км у надирі, але зростає до 48×20 км на краях поля зору [22]. Просторове усереднення даних приладу POLDER, який виконував вимірювання більше 10 років, у підсумку становить 20×20 км [29], а дані супутникового лідара CALIOP усереднюються уздовж підсупутникової траси на відрізках у 5, 20 або 80 км залежно від умов вимірювань [19, 30]. Отже, результати вимірювань з приладом «СканПол» загалом можуть бути використані для оцінювання просторового розподілу аерозольних частинок у атмосфері за концентрацією та характеристиками при їхньому мезомасштабному усередненні, як і дані зазначених вище приладів.

ВИСНОВКИ

У роботі отримано оцінки діапазону кутів розсіювання сонячного випромінювання у найнижчих шарах земної атмосфери та земною поверхнею, що можуть спостерігатися приладом «СканПол» проекту «Аерозоль-УА» з сонячно-синхронної приполярної орбіти висотою 705 км і нахилом 98.1° . Цей діапазон залежить від часу проходження супутником площини земного екватора, тому для оцінки такої залежності обчислення зазначених кутів розсіювання зроблені для цієї орбіти при трьох моментах перетину супутником висхідного вузла на екваторі з довготою 200° : 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв місцевого середнього сонячного часу. Отримані оцінки кутів розсіювання при кожній з трьох реалізацій орбіти для точок на земній поверхні, де зенітна відстань Сонця становить 80° , 50° , та мінімально можлива для кожної реалізації орбіти на дати поблизу літнього і зимового сонцестоянь (21 червня і 21 грудня) та рівнодення (21 вересня) 2020 р. Як очевидно для такої орбіти, у пері-

од від весняного до осіннього рівнодення більша частина вимірювань буде виконуватись над північною півкулею, тоді як у іншу частину року — над південною. З одержаних результатів і їхнього аналізу випливає, що діапазон кутів розсіювання найбільший при найбільшій зенітній відстані Сонця (тут прийнято 80°), яка настає у приполярних широтах північної півкулі у період від весняного до осіннього рівнодення, і у середніх широтах у іншу частину року. Цей максимальний діапазон становить приблизно $51^\circ \dots 149.5^\circ$ для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 21$ год 30 хв та $42^\circ \dots 173^\circ$ для орбіти з $T_{\text{ВВ}} = 23$ год 30 хв, а мінімальний діапазон кутів розсіювання (при мінімальних зенітних відстанях Сонця) становить приблизно $107^\circ \dots 150^\circ$ та $109^\circ \dots 176^\circ$ для зазначених $T_{\text{ВВ}}$ відповідно. Зменшення діапазонів відбувається з боку малих кутів розсіювання.

З аналізу модельних даних випливає, що залежність вимірюваних характеристик аерозолів (фазова функція і ступінь поляризації) від показника заломлення частинок найбільша при кутах розсіювання приблизно від 40 до 180° , і зростає зі збільшенням кутів у цьому діапазоні. З порівняння діапазонів кутів розсіювання, спостережуваних приладом «СканПол», з модельними даними можна зробити висновок, що вимірювання з приладом «СканПол» на сонячно-синхронній приполярній орбіті відповідають необхідним вимогам для визначення мікрофізичних і оптичних характеристик аерозольних частинок. При цьому спостережуваний діапазон кутів роз-

сіювання найбільший для орбіти з місцевим часом, близьким до полудня, що у випадку орбіти з розглянутим тут нахилом приблизно 98° відповідає часові проходження висхідного вузла на екваторі приблизно від 22 год 30 хв до 24 год 00 хв.

Унаслідок орбітального руху супутника лінійні розміри спостережуваної ділянки земної поверхні уздовж підсупутникової траси без урахування переміщення за рахунок обертання сканувальних дзеркал змінюються приблизно від 6 км у надири до майже 60 км при найбільшому куті сканування 60° . Насправді ця величина також істотно залежить від часу експонування приладом вхідного потоку світла. Якщо припустити, що час експонування становить приблизно 1 мс, то ΔL збільшиться майже у півтора рази. Також унаслідок обертання Землі зменшується довгота спостережуваної ділянки приблизно на 1.55° , що відповідає її лінійному зміщенню уздовж паралелі від $\Delta S \approx 172$ км на екваторі до $\Delta S \approx 24.5$ км при $\varphi = 82^\circ$. Це обмежує просторову роздільну здатність приладу «СканПол», і тому результати вимірювань з ним загалом можуть бути використані для оцінювання просторового розподілу аерозольних частинок у атмосфері за концентрацією та характеристиками при їхньому мезомасштабному усередненні.

Автор висловлює подяку рецензентам за цінні зауваження і поради, а також співробітникам відділу атмосферної оптики та приладобудування ГАО НАН України за критичне оцінювання роботи і плідні дискусії.

REFERENCES

1. Abalakin V. K. (1979). *Basics of the ephemerides astronomy*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Ambartsumian V. A., Mustel E. P., Severny A. B., Sobolev V. V. (1952). *Theoretical astrophysics*. Moscow [in Russian].
3. Duma D. P. (2007). *General astrometry*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. 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 Science and Technology*, **23**, № 3, 9–17 [in Ukrainian].
5. Yatskiv Ya. S., Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Shakhovskoy D. N., Sinyavsky I. I., Milinevsky G. P., Kiselev N. N., Ivanov Yu. S., Petukhov V. N., Danylevsky V. O., Bovchalyuk A. P. (2012). Satellite project “AEROSOL-UA”: remote sensing of aerosols in the Earth’s atmosphere. *Space Science and Technology*, **18**, № 4, 3–15 [in Russian].
6. Anderson T. L., Charlson R. J., Winker D. M., Ogren J. A., Holmén K. (2003). Mesoscale Variations of Tropospheric Aerosols. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 119–136.

7. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S. K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X. Y. (2013). Clouds and Aerosols. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. T. F. Stocker et al. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press.
8. Capderou M. (2005). *Satellites Orbits and Missions*. Springer-Verlag France.
9. Dubovik O., Holben B., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanré D., Slutsker I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590—608.
10. Dubovik O., Li Z., Mishchenko M. I., Tanré 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., Stammes 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. and Radiat. Transfer.*, **224**, 474—511.
11. Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B. N., Mishchenko M., Yang P., Eck T. F., Volten H., Muñoz O., Veihelmann B., van der Zande W. J., Leon J.-F., Sorokin M., Slutsker I. (2006). Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *J. Geophys. Res.*, **111**, D11208.
12. Dubuisson P., Roger J. C., Mallet M., Dubovik O. (2006). *A code to compute the direct solar radiative forcing: Application to anthropogenic aerosols during the escompte experiment*. International Radiation Symposium (IRS 2004) on Current Problems in Atmospheric Radiation. (Eds. H. Fischer, B.-J. Sohn, A. Deepak). Hampton, 127—130.
13. Seidelmann P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory supplement to the astronomical almanac*: University Science Books. California: Mill Valley.
14. Forster P., Ramasvamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Dorland R. V. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. S. Solomon et al. Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press.
15. Galytka E., Danylevsky V., Hommel R., Burrows J. P. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 2101—2118.
16. Giles D. M., Sinyuk A., Sorokin M. G., Schafer J. S., Smirnov A., Slutsker I., Eck T. F., Holben B. N., Lewis J. R., Campbell J. R., Welton E. J., Korkin S. V., Lyapustin A. I. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database — automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 169—209.
17. Hansen J., Travis L. D. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.*, **16**, 527—610.
18. Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanré D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. (1998). AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1—16.
19. Kacenenbogen M., Vaughan M. A., Redemann J., Hoff R. M., Rogers R. R., Ferrare R. A., Russell P. B., Hostetler C. A., Hair J. W., Holben B. N. (2011). An accuracy assessment of the CALIOP/CALIPSO version 2/version 3 daytime aerosol extinction product based on a detailed multi-sensor, multi-platform case study. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 3981—4000.
20. Kaufman Y. J. (1993). Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. *J. Geophys. Res.*, **98** (D2), 2677—2692.
21. Laci A., Mishchenko M. (1995). Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: A radiative modeling perspective on atmospheric aerosols. *Aerosol Forcing of Climate*. Eds. R. J. Charlson, J. Heintzenberg. Jon Wiley&Sons Ltd., 11—42.
22. Levy R. C., Mattoo S., Munchak L. A., Remer L. A., Sayer A. M., Patadia F., Hsu N. C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2989—3034.
23. Ma X., F. Yu, Luo G. (2012). Aerosol direct radiative forcing based on GEOS-Chem-APM and uncertainties. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 5563—5581.
24. 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 Astronautica*, **123**, 292—300.
25. Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. (2007). Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **88**, 677—691.
26. Myhre G., Stordal F., Bergelen T. F., Sundet J. K., Isaksen I. S. A. (2004). Uncertainties in the radiative forcing due to sulfate aerosols. *J. Atmospheric Sci.*, **61** (5), 485—498.
27. Penner J. E., Andreae M., Annegarn H., Barrie L., Feichter J., Hegg D., Jayaraman A., Leaitch R., Murphy D., Nganga J., Pitari G. (2001). Aerosols, their Direct and Indirect Effects. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Work-*

- ing Groupe I Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. J. T. Houghton, et al. Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press.
28. Standish E. M. (1998). JPL planetary and lunar ephemerides. DE405/LE405, JPL IOM 312.F-98-048.
29. Su X., Goloub P., Chiappello I., Chen H., Ducos F., Li Z. (2010). Aerosol variability over East Asia as seen by POLDER space-borne sensors. *J. Geophys. Res.*, **115**, D24215.
30. Young S. A., Vaughan M. A. (2009). The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: Algorithm description. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, **26**, 1105–1119.

Received 07.11.2019

V. O. Danylevsky

Senior Researcher, Ph. D.

E-mail: vdanylevsky@gmail.com, vdan@observ.univ.kiev.ua

Astronomical observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv

3 Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine

27 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143 Ukraine

ANGULAR PROPERTIES OF THE SOLAR LIGHT SCATTERING IN THE TERRESTRIAL ATMOSPHERE OBSERVED BY THE SCANPOL INSTRUMENT OF THE AEROSOL-UA PROJECT

Angular characteristics of solar light scattering in the Earth's atmosphere and parameters of the atmosphere volume and the surface part observed by the ScanPol instrument of the "Aerosol-UA" project are estimated in order to determine properties of aerosol particles from a satellite orbit. Estimations were obtained for the scattering angles ranges in the lower troposphere which can be observed by the ScanPol instrument from the polar sun-synchronous orbit with altitude 705 km and inclination 98.1° crossing the ascending knot on the equator at 21^h30^m , 22^h30^m , and 23^h30^m of local mean solar time. The estimations of the scattering angles were obtained at each of the orbit realizations for sites on the Earth's surface, where the zenith angle of the Sun is 80° , 50° , and minimal one for each of the orbit realizations. The calculations were performed for the dates of 2020 close to the summer solstice, the autumnal equinox, and the winter solstice (namely 21 June, 21 September, and 21 December, respectively). The scattering angles range was computed for the range of the ScanPol scanning angles equal to 110° along the sub-satellite trace. The range of scattering angles is maximal at the maximal zenith angle of the Sun equal to 80° , which occurs at the north hemisphere for the scene located at polar north latitudes during the period between the spring and the autumnal equinoxes and in the middle latitudes during the rest of a year. The maximal range of scattering angles is approximately $51.1^\circ \dots 149.5^\circ$ close to the summer solstice for the satellite orbit with local time of crossing the ascending node (T_{BB}) equal to 21^h30^m and $41.9^\circ \dots 172.9^\circ$ for the orbit with $T_{BB} = 23^h30^m$. The minimal range of scattering angles occurs at minimal zenith angles of the Sun close to the winter solstice and takes on the values approximately $103.2^\circ \dots 142.8^\circ$ and $108.2^\circ \dots 170.4^\circ$ at mentioned T_{BB} , respectively. For the rest of the zenith angles of the Sun, the range of scattering angles takes on the intermediate values. The range of scattering angles decreased mainly at the cost of small scattering angles. In summary, the range of observed scattering angles is maximal for the orbit with local time close to the noon, to be precise at T_{BB} between 22^h30^m and 24^h00^m for the orbit with inclination assumed here. Comparison of the ranges of scattering angles observed by the ScanPol instrument and data of simulations showed that measurements by the ScanPol from the considered orbit allow us to retrieve microphysical and optical properties of aerosol particles. Linear size of the scene observed by instrument along the sub-satellite trace increases during the scanning process from approximately 6 km at nadir to almost 60 km at maximal scattering angle equal to 60° , and simultaneously the longitude of the observed scene decreases by 1.55° that corresponds to linear shift along the parallel from $\Delta S \approx 172$ km on the equator to $\Delta S \approx 24.5$ km on the latitude 82° . That is why data measured by the ScanPol can be used after mesoscale averaging.

Keywords: the Earth's atmosphere, optics of the atmosphere, remote sensing, aerosols, scattering of the solar light.