

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.061>
УДК 520.82, 520.88

В. П. ЄПШЕВ¹, старш. наук. співроб., доц. каф. оптики, канд. фіз.-мат. наук
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

В. І. КУДАК¹, мол. наук. співроб.
E-mail: viktor.kudak@uzhnu.edu.ua

І. І. МОТРУНИЧ¹, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

В. М. ПЕРІГ¹, мол. наук. співроб.
E-mail: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

І. Ф. НАЙБАУЕР¹, інженер
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

В. І. ПРИСЯЖНИЙ², нач. Національного центру управління та випробувань космічних засобів
E-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

¹ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Лабораторія космічних досліджень
вул. Далека 2а, Ужгород, Україна, 88000

²Національний центр управління та випробувань космічних засобів
вул. Московська 8, Київ, Україна, 01010

ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ ШТУЧНОГО СУПУТНИКА ЗЕМЛІ У ВИПАДКУ ДИФУЗНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА ЙОГО ПОВЕРХНЕЮ

Описуються основи розробленої методики визначення орієнтації низькоорбітальних і геосинхронних космічних апаратів за результатами спостережень дифузного розсіювання світла їхніми поверхнями. Дане розсіювання можна описати фазовими функціями, які залежать від форми розсіювальної поверхні, її орієнтації відносно напрямків на джерело випромінювання і приймач. Визначення за цими даними орієнтації опроміненого об'єкта у вибраній системі координат є одним із випадків розв'язку оберненої задачі. Поверхня космічного апарата є суперпозицією кількох стереометричних поверхонь, що одночасно розсіюють світло на спостерігача, але по-різному орієнтовані до нього, що значно ускладнює розв'язок. Реалізацію розробленої методики показано на результатах колориметричних спостережень американського метеорологічного штучного супутника Землі NOAA-18 циліндроподібної форми з двома плоскими панелями сонячних батарей.

Ключові слова: штучні супутники Землі, орієнтація, методика, фотометрія, колориметрія.

ВСТУП

Орієнтація космічного апарату (КА) на орбіті у першу чергу зумовлена поставленим перед ним завданням. Її стан, підтримка, зміна та відсутність є однією із ключових характеристик поведінки штучного супутника Землі (ШСЗ) на

орбіті, викликані природними чи штучними причинами. Тому постійний контроль за станом орієнтації КА його власником, з одного боку, та її оцінка зацікавленими з різних причин іншими країнами, з іншого боку, є пріоритетним завданням в області космічного моніторингу навколоземного простору.

Цитування: Єпшев В.П., Кудак В. І., Мотрунич І. І., Періг В. М., Найбауер І. Ф., Присяжний В. І. Визначення орієнтації штучного супутника Землі у випадку дифузного розсіювання світла його поверхнею. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 61—69. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.061>

Як показує практика, у випадку відсутності зв'язку з КА його орієнтацію можна оцінити досить точно за результатами пасивних наземних позиційних та фотометричних спостережень в оптичному діапазоні.

До фотометричного методу оцінки форми і орієнтації ШСЗ науковці почали звертатися ще у першому десятиріччі космічної ери. Але більшість відомих публікацій носили теоретичний характер, або в них розглядалися окремі спрощені випадки орієнтації космічного об'єкта [2, 3, 10]. У наступні десять років найбільш глибоко в теоретичному плані задачу визначення орієнтації чисто циліндроподібних об'єктів, як у випадку дифузного, так і дзеркального відбивання світла за результатами фотометричних спостережень, було розглянуто в роботі [11]. При дифузному відбиванні світла автор аналізує різні можливі варіанти кривих блиску в залежності від розмірів об'єкта і фазового кута, а також положення у просторі площини його власного обертання. У випадку дзеркального відбивання автор розглядає використання законів відбивання світла від поверхонь.

Підсумки розвитку систем орієнтації ШСЗ і їхня оцінка за 20 років були підведені в роботі [7].

З другої половини 1970-х рр. практичне використання результатів фотометричних спостережень ШСЗ в США стали носити закритий характер майже до початку 2000-х рр. За цей час вони набули швидкого розвитку в Одесі і Ужгороді, зокрема і в напрямку їхнього практичного застосування в комплексі з результатами позиційних спостережень [1, 5, 12]. Але в цих роботах в основному розглядалося лише дзеркальне відбивання світла.

Наростання фотометричних спостережень геостационарних супутників (ГСС) теж поставило питання про оцінку їхньої орієнтації, особливо різних антен, розміщених на поверхнях цих об'єктів, або ступеня їхньої дестабілізації [4, 6, 8, 17].

З початку 2000-х років у відкритих джерелах США з'явилися ряд публікацій, в яких теж розглядалося практичне використання сучасних досягнень в області фотометрії штучних космічних об'єктів для їхньої ідентифікації та оцінки пове-

дінки на орбіті [9, 15, 18]. Наприклад, в роботі [18] криві блиску використовувалися вже для автономного (майже в режимі реального часу) визначення форми КА разом з його станом (обертальним та поступальним) на базі багатомодельного адаптивного підбору [14].

Питання практичного використання фотометричних даних у випадку чисто дифузного розсіювання світла у задачах визначення орієнтації ШСЗ в реальному часі протягом цих років залишалося в основному на стадії обговорення. Перш ніж робити оцінку орієнтації КА, потрібно врахувати велику кількість чинників, які діють на видимий блиск ШСЗ. Крім того, дифузне розсіювання світла від будь-якої поверхні (часто досить складної конфігурації) залежить від форми цієї поверхні і її орієнтації у просторі, тобто від двох невідомих факторів.

Обробка навіть однієї кривої блиску вимагала багато обчислень та затрат часу і ставила ряд питань до ступеня достовірності отриманих результатів, коли поверхня супутника складається з двох чи більше стереометричних поверхонь, що блокувало шляхи реалізації методу на практиці.

Останнім часом в ЛКД УжНУ завдяки розробленим відповідним програмам вдалося обійти більшість труднощів при аналізі дифузного розсіювання світла, особливо одночасного від кількох стереометричних поверхонь. Розроблені ключові засади методики відпрацьовані на результатах спостережень діючих на орбіті КА. Її успішне впровадження, на наш погляд, допоможе в десятки разів розширити можливості космічного моніторингу як діючих ШСЗ, так і об'єктів «космічного сміття».

БАЗОВІ ЗАСАДИ МЕТОДИКИ

На практиці дзеркальні спалахи, та ще й в достатній кількості, спостерігаються далеко не завжди. Блиск супутників в основному зумовлений дифузним розсіюванням світла їхніми поверхнями, тобто розсіюванням світла у будь-якому напрямку в залежності від стереометричної форми освітленої ділянки цієї поверхні. Через це розв'язок задачі значно ускладнюється, бо характер дифузного відбивання світла зумовлений вже двома взаємопов'язаними причина-

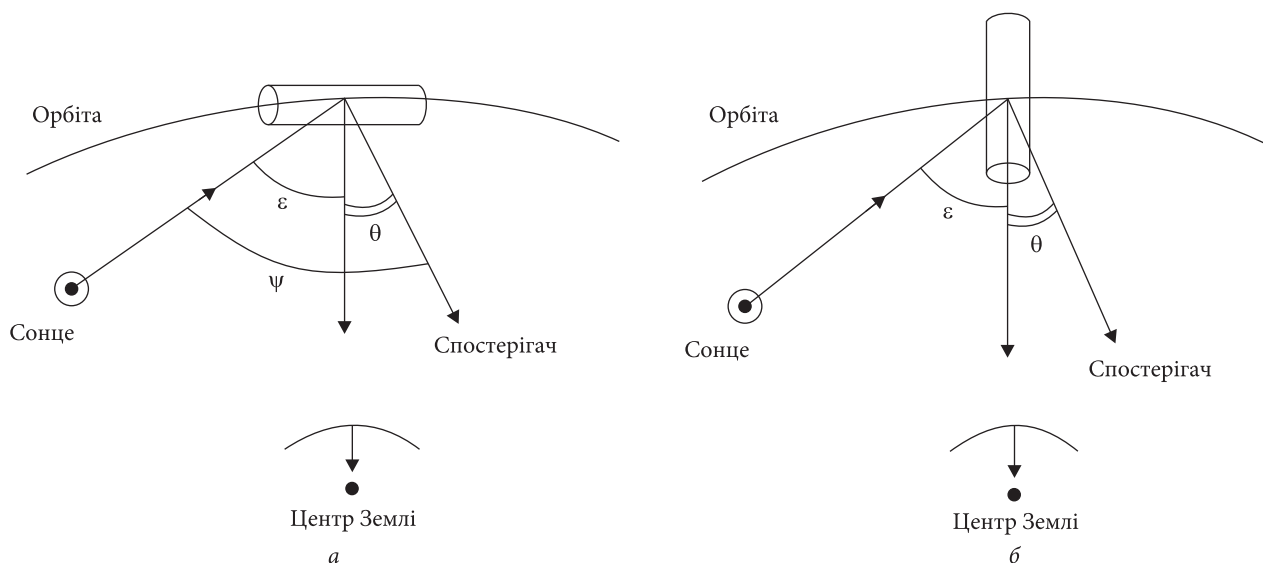


Рис. 1. Можливі варіанти орієнтації циліндроподібного ШСЗ на орбіті: *a* — варіант I, *б* — варіант II (ψ — фазовий кут об'єкта, ϵ — кут падіння світла, θ — кут відбивання світла відносно напрямку «центр КА — центр Землі»)

ми — формою розсіювальної поверхні та її орієнтацією у просторі відносно Сонця та спостерігача. Зміна блиску при цьому виражається так званою фазовою залежністю, де невідомих (форма, орієнтація) може бути два чи більше. Визначення за цими даними орієнтації відбивальної поверхні можливе лише через врахування її форми шляхом використання відомих моделей різноманітних об'єктів або заданням всіх відомих систем орієнтації та зіставленням розрахункових даних з результатами спостережень методом послідовних наближень, щоб знайти, при якій орієнтації об'єкта спостережувана фазова залежність блиску КА описується найкраще.

На практиці розв'язок задачі полягає у правильному виборі фазової функції $\varphi(\psi_i)$ і визначенні на її основі поправки

$$\Delta m_{\psi_i} = -2.5 \lg[\varphi(\psi_i)/\varphi(\psi_{CT})], \quad (1)$$

яка при перерахунку стандартизованого блиску ШСЗ на фазовий кут $\psi_{CT} = 0$ привела б його у межах похибок до постійного значення вздовж окремої ділянки чи всієї кривої блиску. Тут $\varphi(\psi_i)$ — фазова функція на *i*-му фазовому куті, $\varphi(\psi_{CT})$ — на стандартному фазовому куті (як правило, $\psi_{CT} = 0$), де вона для сфери і циліндра дорівнює одиниці [1], і у подальших розрахунках не розглядається.

Розглянемо реалізацію методики на прикладі визначення орієнтації нескінченно витягнутих циліндроподібних ШСЗ. Дані об'єкти в застabilізованому робочому стані можуть бути орієнтовані на орбіті головною повздовжньою віссю вздовж напрямку вектора його руху по орбіті (рис. 1, *a*), або до центра Землі (рис. 1, *б*).

З роботи [16] відомо, що фазова залежність розсіяного світла циліндром по відношенню до його основних осей, поперечної і повздовжньої (рис. 1), має вигляд

$$\varphi(\psi) = 1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cos \epsilon \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

$$\varphi(\psi) = 1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \sin \epsilon \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де ψ — фазовий кут об'єкта (між напрямками на спостерігача і на Сонце), ϵ — кут падіння світла на об'єкт по відношенню до однієї з основних осей, θ — кут відбивання світла від поверхні об'єкта на спостерігача до цієї самої осі.

У випадку фотометричних спостережень циліндроподібних ШСЗ наведено вище фазову залежність розсіяння можна використати, згідно з відомою з астрономії формулою Погсона, в шкалі зоряних величин як поправку за фазу у блиск КА, приведеного раніше до стандартних умов з урахуванням змін блиску за віддаль, повітряну

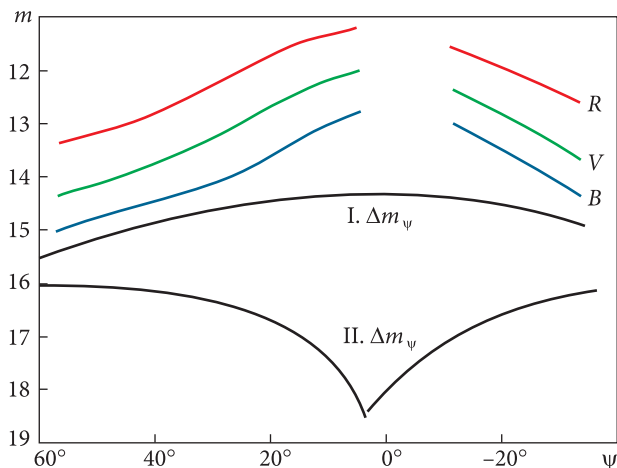


Рис. 2. Крива блиску у спектральних смугах *B*, *V*, *R* циліндроподібного геостационарного ШСЗ і зміни фазової поправки для такого об'єкта в залежності від його орієнтації на орбіті. Варіант I відповідає орієнтації на рис. 1, *a*, варіант II — рис. 1, *б*

масу, відбитого від земної поверхні світла, як:

$$\Delta m_{\psi 1} = 2.5 \lg(1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \theta), \quad (4)$$

$$\Delta m_{\psi 2} = 2.5 \lg(1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta). \quad (5)$$

Якщо КА орієнтований на орбіті згідно з рис. 1, *a*, до центра Землі буде направлено його поперечну вісь, а згідно з рис. 1, *б* — його поздовжню вісь. Напрямок із центра супутника до центра Землі (а він в даній методиці базовий), розраховується за результатами позиційних спостережень через визначення геоцентричних координат ШСЗ на момент спостережень в екваторіальній системі координат з подальшим їхнім поворотом на 180°. Всі інші кути (ψ , ε , θ) на вибрані моменти часу теж визначаються з даних позиційних спостережень за відомою в астрономії формулою косинусів, а за формулами (4), (5) розраховуються вже поправки $\Delta m_{\psi 1}$ і $\Delta m_{\psi 2}$. Їхню зміну з часом для обох випадків орієнтації КА приведено на рис. 2.

Отримані таким чином результати зіставляються з кривою зміни блиску досліджуваного КА, приведеною до стандартних умов з урахуванням поправки за топоцентричну віддаль до нього, зміну товщини повітряної маси на шляху «супутник — спостерігач», стану земної атмос-

фери. Аналіз збігу чи розходження розрахункових поправок Δm_{ψ} та отриманих зі спостережень змін стандартизованого блиску об'єкта дозволяє остаточно визначитися, яку орієнтацію на орбіті має даний КА. Якщо у блиск ШСЗ вносять суттєвий вклад ще й панелі сонячних батарей (ПСБ), які у більшості випадків плоскі, його розрахунок, за потреби, проводиться окремо за іншою фазовою функцією розсіювання світла від площини [16]. У шкалі зоряних величин ця фазова функція має вигляд

$$\Delta m_{\psi 3} = 2.5 \lg(\cos \varepsilon_2 \cdot \cos \theta_2), \quad (6)$$

де ε_2 і θ_2 — відповідно кут падіння та кут відбивання світла від поверхні ПСБ відносно напрямку нормалі до неї. Якщо поверхня КА охоплює ще більше складових, потрібно продовжити процес підбору відповідних фазових функцій і їхнє включення в розрахунок.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРІЄнтації НА ОРбіті КА NOAA-18

Розроблену методику було відпрацьовано у процесі дослідження функціонування на орбіті КА NOAA-18 (рис. 3) за результатами його спостережень у двох смугах *B*, *V*. Типові криві блиску супутника приведено на рис. 4.

Розрахункові дані відповідних кутів на моменти спостережень даного КА, поправки за фазову функцію $\Delta m_{\psi 2}$ та $\Delta m_{\psi 3}$, стандартизоване значення блиску супутника до та після введення поправки за фазу, представлено в табл. 1. У першій графі таблиці — час спостережень КА NOAA-18

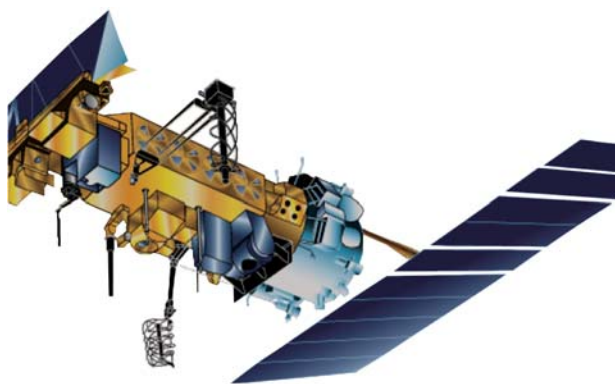


Рис. 3. Загальний вид КА NOAA-18

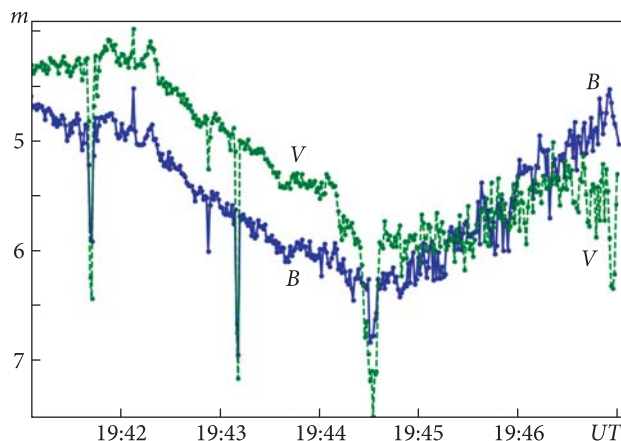


Рис. 4. Крива блиску КА NOAA-18, отримана 21.05.2020 р. Супутник орієнтований повздовжньою віссю до центра Землі. У момент часу 19:44:30 він був напрямлений торцевою частиною до спостерігача

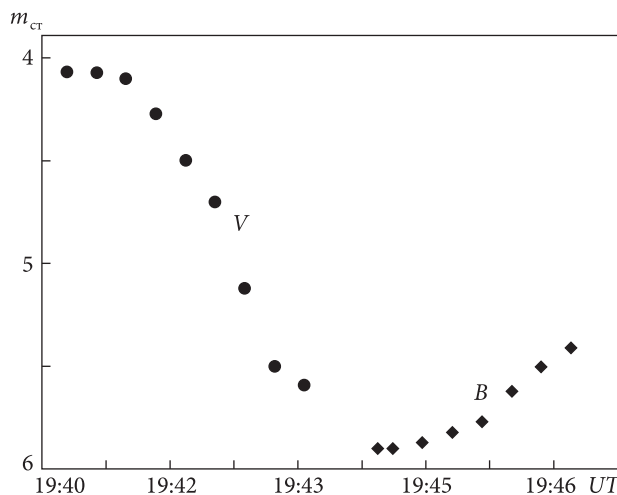


Рис. 5. Стандартизоване значення блиску КА NOAA-18 від його корпусу (смуга V) та ПСБ (смуга B)

Таблиця 1. Розраховані значення фазових поправок $\Delta m_{\psi 1}$ і $\Delta m_{\psi 2}$ і їхнє врахування у блиск ПСЗ NOAA-18 за 21.05.2020 р.

UT	ψ	ε_1	θ_1	$\Delta m_{\psi 2}$	$m_{ст}$	$m_{ст}^x$	ε_2	θ_2	$\Delta m_{\psi 3}$	$m_{ст}$	$m_{ст}^x$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19 ^h 41 ^m 05 ^s	63.25°	74.19°	49.92°	-0.80	4.07	3.27					
19 ^h 41 ^m 25 ^s	66.96	75.11	47.82	-0.89	4.07	3.18					
19 ^h 41 ^m 45 ^s	72.21	76.09	45.55	-0.98	4.10	3.12					
19 ^h 42 ^m 05 ^s	76.03	77.07	43.23	-1.15	4.27	3.12					
19 ^h 42 ^m 25 ^s	81.42	78.05	41.00	-1.37	4.50	3.13					
19 ^h 42 ^m 45 ^s	87.31	79.03	39.09	-1.64	4.70	3.16					
19 ^h 43 ^m 05 ^s	93.59	80.01	37.77	-1.99	5.12	3.13					
19 ^h 43 ^m 25 ^s	100.09	81.00	37.27	-2.49	5.50	3.01					
19 ^h 43 ^m 45 ^s	106.60	81.98	37.68	-3.38	5.59	3.60					
19 ^h 44 ^m 05 ^s	112.90	82.98	38.91	μ	6.50	—					
19 ^h 44 ^m 35 ^s	121.50						33°	84.80°	-2.82	5.90	3.19
19 ^h 44 ^m 45 ^s	124.30						33	84.20	-2.71	5.90	3.19
19 ^h 45 ^m 05 ^s	129.10						33	83.60	-2.61	5.87	3.26
19 ^h 45 ^m 25 ^s	133.40						33	83.10	-2.51	5.82	3.31
19 ^h 45 ^m 45 ^s	137.20						33	82.60	-2.45	5.77	3.32
19 ^h 46 ^m 05 ^s	140.40						33	82.10	-2.37	5.62	3.25
19 ^h 46 ^m 25 ^s	143.20						33	81.60	-2.31	5.50	3.19
19 ^h 46 ^m 45 ^s	145.60						33	81.10	-2.27	5.41	3.16

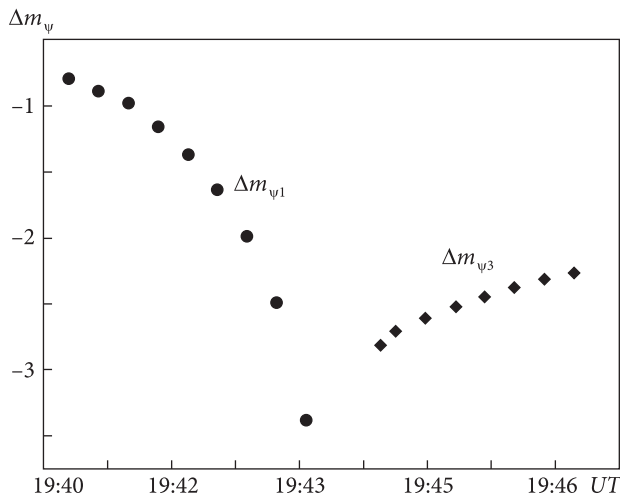


Рис. 6. Фазова поправка у блиск КА NOAA-18 від циліндроподібного корпусу ($\Delta m_{\psi 1}$) та ПСБ ($\Delta m_{\psi 3}$)

у шкалі всесвітнього часу, у другій — фазовий кут супутника, в третій і четвертій — кут падіння світла на його корпус ε_1 та відбивання від нього θ_1 , у п'ятій — фазова поправка, розрахована згідно з формулою (5), у шостій — стандартизована зоряна величина об'єкта до введення фазової поправки $\Delta m_{\psi 1}$ (взята з кривої блиску — рис. 4), у сьомій — зоряна величина КА після врахування фазової поправки $\Delta m_{\psi 1}$, у восьмій і дев'ятій — кут падіння світла на ПСБ ε_2 та відбивання від нього θ_2 , у десятій — фазова поправка, розрахована згідно з формулою (6), в одинадцятій — зоряна величина об'єкта до введення фазової поправки $\Delta m_{\psi 2}$ (права гілка кривої блиску, рис. 4), у дванадцятій — зоряна величина КА після врахування фазової поправки $\Delta m_{\psi 2}$.

Даний КА має синхронно-сонячну, практично полюсну орбіту з кутом нахилу орбіти $i = 99.05^\circ$. Його освітлення Сонцем змінюється в досить малих межах, а освітлення ПСБ на інтервалах до 10 хв залишається постійним. В даному випадку за результатами спостережень видно, що кут ε_2 лежить у межах $31...35^\circ$. В розрахункових поправках $\Delta m_{\psi 3}$ взято його середнє значення $\varepsilon_2 \approx 33^\circ$.

Графічно результати аналізу відображено на рис. 5 і 6. З приведених даних видно, що зміна блиску КА вздовж лівої гілки кривої досить добре описується фазовою функцією для цилін-

дроподібних об'єктів, орієнтованих повздовжньою віссю до центра Землі, а вздовж правої — фазовою функцією для площини. На фазових кутах $106...110^\circ$ фазова функція для циліндра переходить у невизначеність (див. табл. 1). Тобто, відбитого світла на $\psi > 106^\circ$ спостерігач від циліндра бачити не може. Отже, на правій гілці кривої, де $\psi \geq 110^\circ$, блиск даного КА зумовлений лише ПСБ, яку спостерігачеві видно з часом все краще і краще. Різка зменшення блиску КА поблизу кульмінації викликане орієнтацією торцевої частини у бік спостерігача і відсутністю блиску від його корпусу на фазових кутах понад 106° .

Отримані результати підтверджуються значеннями колор-індекса $C = B - V$, отриманого з кривих блиску у системі B і V (рис. 4). Вздовж лівої гілки кривої $C = 0.65^m$ (відбиття світла від білої металевої поверхні). Вздовж правої гілки $C = 0.00^m...-0.31^m$ в даному випадку поверхня ПСБ.

ВИСНОВКИ

Розроблена методика може застосовуватися незалежно від конструкції об'єкта, розміщення відбивальних ділянок його поверхні відносно головних осей та фізичних характеристик розсіюваного ним сонячного світла. Це значно розширює коло досліджуваних об'єктів, їхнього стану (робочого чи дестабілізованого).

Похибка оцінки орієнтації ШСЗ, коли він розсіює світло лише дифузно, збільшується що найменше до $1^\circ-2^\circ$. В даному випадку, на відміну від дзеркального відбивання, коли вона в основному зумовлена точністю визначення положення КА у момент дзеркального спалаху, його формою і тривалістю, у випадку дифузного відбивання якість відбитого світлового променя залежить від цілого ряду додаткових чинників. Це похибка врахування поправок за топоцентричну віддаль до об'єкта, товщину повітряної маси на шляху променя від КА, стану атмосфери, визначення фазового кута, використання фазових функцій розсіювання світла від тих чи інших стереометричних поверхонь, їхньої суперпозиції. Але попри всі складнощі розрахунків значно розширюється число досліджуваних космічних об'єктів, бо вони у переважній більшості відбивають світло дифузно.

Бажано проводити не просто фотометрію КА, а її різновид — колориметричні спостереження ШСЗ, тобто синхронно в кількох спектральних областях. Це дає можливість відділити і ототожнити конкретний фрагмент поверхні об'єкта, що в даний момент відбиває світло на спостерігача,

і далі визначити його орієнтацію у заданій системі координат. Що більше таких колірних каналів використовуються під час спостережень, то достовірнішою буде інформація про конструктивні особливості поверхні та функціонування ШСЗ на орбіті і його програмні завдання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Братийчук М. В., Гвардионов А. Б., Епишев В. П. и др. Фотоэлектрическая фотометрия спутника “Интеркосмос-Болгария 1330”. *Кинематика и физика небес. тел.* 1986. **2**, № 1. С. 60—65.
2. Григоревский В. М. Определение ориентации ИСЗ у пространстве по фотометрическим данным. *Бюл. ст. оптич. наблюд. искусств. спутников Земли.* 1959. № 10. С. 1—9.
3. Григоревский В. М., Лейкин Г. А. Определение положения оси вращения продолговатого спутника по отношению экстремальных значений блеска и смещению моментов экстремума. *Бюл. ст. оптич. наблюд. искусств. спутников Земли.* 1960. № 12. С. 3—9.
4. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Анализ наземной информации об аварийном геостационарном спутнике DSP F-23. *Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.* 2010. № 4. С. 81—84.
5. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению. *Астрометрия и астрофизика.* 1983. № 50. С. 89—93.
6. Єпішев В. П., Сухов П. П., Мотрунич І. І. та ін. Можливості національних оптичних засобів спостереження за космічним простором щодо контролю геостационарної орбіти у інтересах збройних сил України. *Сучасні інформ. технології у сфері безпеки та оборони.* 2018. № 3 (33). С. 72—81.
7. Робертсон Р. Е. Двадцатилетняя история развития систем ориентации космических аппаратов. *Ракетная техника и космонавтика.* 1979. **17**, № 2. С. 120—128.
8. Сухов П. П., Епишев В. П., Сухов К. П., Карпенко Г. Ф., Мотрунич И. И. Результаты комплексных исследований функционирования на орбите геосинхронного спутника “SBIRS GEO-2”. *Космічна наука і технологія.* 2017. **23**, № 1. С. 63—70.
9. Dao P., Josties E. H., Boroson T. *Automated algorithms to identify geostationary satellites and detect mistagging using concurrent spatio-temporal and brightness information.* Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2016. URL: www.amostech.com (дата звернення: 26.01.2021).
10. Davis R. J., Whipple F. L., Zirker J. B. *The orbit of a small Earth satellite.* London, 1958.
11. Giese Richard H. Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report.* 1963. № 127. P. 1—47.
12. Koshkin N., Korobeynikova E., Shakun L., Strakhova S., Tang Z. H. Remote sensing of the EnviSat and Cbers-2B satellites rotation around the centre of mass by photometry. *Adv. Space Res.* 2016. **58**, № 3. P. 358—371.
13. Kudak V. I., Epishev V. P., Perig V. M., Neybauer I. F. Determining the orientation and spin period of TOPEX/Poseidon satellite by a photometric method. *Astrophys. Bull.* 2017. **72**, № 3. P. 340—348.
14. Linares R., Crassidis J., Jah M., Kim H. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference.* 2010. P. 8341.
15. Payne T. E., Castro P. J., Moody J. W. A discrimination analysis of Sloan and Johnson photometric systems for non-resolved object characterization. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference.* 2016. URL: www.amostech.com (дата звернення: 26.01.2021).
16. Rambauske W. R., Gruenzel R. R. Distribution of diffuse optical reflection around some stereometric surfaces. *J. Opt. Soc. Amer.* 1965. **55**(3). P. 315—318.
17. Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I. Photometrical research of GSS “Intelsat 10-02”. *Odessa Astron. Pubs.* 2009. **22**. P. 55—59.
18. Wetterer C. J., Jah M. Attitude estimation from light curves. *J. Guid., Contr. and Dyn.* 2009. **32**, № 5. P. 16482.

REFERENCES

1. Bratiychuk M. V., Guardionov A. B., Epishev V. P., et al. (1986). Photoelectric photometry of the satellite “Intercosmos-Bulgaria 1330”. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **2**(1), 60–65 [In Russian].
2. Grigorevsky V. M. (1959). Determination of the satellite orientation in space using photometric data. *Bul. stations wholesale. satellite observations*, № 10, 1–3 [In Russian].
3. Grigorevsky V. M., Leikin G. A. (1960). Determination of the position of the axis of rotation of an elongated satellite in relation to the extreme values of brightness and the shift of the moments of the extremum. *Bul. stations wholesale. satellite observations*, № 12, 3–9 [In Russian].
4. Didenko A. V., Usoltseva L. A. (2010). Analysis of ground information on the emergency geostationary satellite DSP F23. *Bull. NAS RK. Ser. Phys. and mathemat.*, № 4, 81–84 [In Russian].
5. Epishev V. P. (1983). Determination of the orientation of ASE in space by their mirror reflection. *Astrometry and Astrophysics of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, № 50, 89–93 [In Russian].
6. Yepishev V. P., Motrunich I. I., Perig V. M., Kudak V. I., Nibauer I. F., Sukhov P. P., ... Myslyvyy S. O. (2018). Possibilities of national optical means of space observation for control of geostationary orbit in the interests of the Armed Forces of Ukraine. *Modern Inform. Technologies in the Sphere of Security and Defence*, **33**, № 3, 61–70 [In Ukrainian].
7. Robertson R. E. (1979). Twenty-year history of the development of spacecraft attitude control systems. *Rocket Technol. and Astronaut.*, **17**(2), 120–128.
8. Sukhov P. P., Epishev V. P., Sukhov K. P., Karpenko G. F., Motrunich I. I. (2017). The results of comprehensive studies of the operation of the geosynchronous satellite “SBIRS-GEO-2” in orbit. *Space Science and Technol.*, **23**, № 1, 63–70 [In Russian].
9. Dao P., Heinrich-Josties E., Boroson T. (2016). *Automated algorithms to identify geostationary satellites and detect mistagging using concurrent spatio-temporal and brightness information*. Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. URL: www.amostech.com (Last accessed: 26.01.2021).
10. Davis R. J., Whipple F. L., Zirker J. B. (1958). *The orbit of a small earth satellite*. London.
11. Giese R. H. (1963). Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report*, 127.
12. Koshkin N., Korobeynikova E., Shakun L., Strakhova S., Tang Z. H. (2016). Remote sensing of the EnviSat and Cbers-2B satellites rotation around the centre of mass by photometry. *Adv. Space Res.*, **58**(3), 358–371.
13. Kudak V. I., Epishev V. P., Perig V. M., Neybauer I. F. (2017). Determining the orientation and spin period of TOPEX/Poseidon satellite by a photometric method. *Astrophys. Bul.*, **72**(3), 340–348.
14. Linares R., Crassidis J., Jah M., Kim H. (2010). Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 8341.
15. Payne T. E., Castro P. J., Moody J. W., Beecher E. A., Fisher M. D., Acosta R. I. (2016). A discrimination analysis of Sloan and Johnson photometric systems for non-resolved object characterization. Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. URL: www.amostech.com (Last accessed: 26.01.2021).
16. Rambauske W. R., Gruenzel R. R. (1965). Distribution of diffuse optical reflection around some stereometric surfaces. *J. Opt. Soc. Amer.*, **55**(3), 315–318.
17. Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I. (2009). Photometrical research of GSS «INTELSAT 10-02». *Odessa Astron. Pubs*, **22**, 55–59.
18. Wetterer C. J., Jah M. (2009). Attitude determination from light curves. *J. Guid., Contr. and Dyn.*, **32**(5), 1648–1651.

Стаття надійшла до редакції 26.01.2021

Після доопрацювання 12.01.2022

Прийнято до друку 24.01.2022

Received 26.01.2021

Revised 12.01.2022

Accepted 24.01.2022

*V. P. Epishev*¹, Senior Researcher, Associate Professor at the Dept. of Optics, Ph.D. in Phys.&Math.

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. I. Kudak*¹, Junior Researcher

Email: viktor.kudak@uzhnu.edu.ua

*I. I. Motrunich*¹, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. M. Perig*¹, Junior Researcher

Email: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

*I. F. Neubauer*¹, Engineer

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. I. Prysiazhnyi*², Chief of the National Space Facilities Control and Test Center

Email: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

¹Space Research Laboratory, Uzhhorod National University

2a, Daleka Str., Uzhhorod, Zakarpatska Distr., 88000, Ukraine

²National Space Facilities Control and Test Center

8, Moskovska Str., Kyiv, 01010 Ukraine

DETERMINATION OF THE ORIENTATION OF THE ARTIFICIAL EARTH SATELLITE IN THE CASE OF DIFFUSIVE SCATTERING OF LIGHT BY ITS SURFACE

The paper considers the basics of the developed method for determining the orientation of low-orbit and geosynchronous spacecraft based on the results of observations of diffuse light scattering by their surfaces. This scattering can be described by phase functions that depend on the shape of the scattering surface, its orientation relative to the directions to the radiation source, and the receiver. Determining the orientation of the irradiated object in the selected coordinate system is one of the cases of solving the inverse problem. The surfaces of the spacecraft are a superposition of several stereometric surfaces that simultaneously scatter light onto the observer, but are differently oriented towards him, which greatly complicates the solution. The application of the developed method was carried out using the data of colorimetric observations of the American meteorological artificial satellite “NOAA-18”, which has a cylindrical shape with two flat solar panels.

Keywords: artificial satellites of the Earth, colorimetry, methodology, orientation, photometry.