

<https://doi.org/10.15407/knit2022.05.075>

УДК 523.24.312

П. П. СУХОВ¹, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: psukhov@ukr.net

К. П. СУХОВ², мол. наук. співроб., програміст

О. Л. ПАВЛОВСЬКИЙ², нач. відділу

С. А. МАМРАЙ², нач. лаб. ведення Головного каталогу та аналізу космічної обстановки

¹Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова

вул. Маразліївська 16, Одеса, Україна, 65122

E-mail: psukhov@ukr.net

²Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Центр космічних спостережень

вул. Пушкінська 40, Житомир, Україна, 10002

E-mail: sppete@ukr.net, pal2978@bigmir.net, sergan1502@gmail.com

ФОТОМЕТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ПОВЕРХНІ ГЕОСТАЦІОНАРНОГО ОБ'ЄКТА

Представлено новий спосіб використання фотометричних даних для визначення деградації оптичних показників поверхні ГСС від часу активної роботи ГСС на орбіті. Наведено експериментальні дані зміни коефіцієнтів спектрального відбиття поверхні декількох геостационарних супутників з різними типами космічних платформ протягом кількох років. Дані отримано методом наземних фотометричних BVR-спостережень геостационарних супутників «Astra 2E» (платформа «Eurostar-3000»), «Azerspace 2/Intelsat 38» (платформа SSL-1300), «Sicral 2» (платформа «Spacebus-4000B2»), «Vlagovest 11L» (платформа «Ekspress-2000»). Виявлено, що характер зміни відбивної спроможності для геостационарних супутників різний. Космічні матеріали поверхні геостационарних супутників, виготовлених у другому десятилітті 21-го століття, більш стійкі до впливу агресивного космічного середовища, ніж у супутників, виготовлених наприкінці 20-го століття. Запропоновано шляхи визначення типу космічного матеріалу на основі даних багатоколірних фотометричних спостережень у різних спектральних смугах. Пропонується використовувати результати наземних багатоколірних фотометричних спостережень як доповнення до лабораторного методу визначення ступеня деградації поверхні КА.

Ключові слова: деградація відбивних характеристик, космічна платформа, багатоколірна фотометрія, коефіцієнти відбиття, геостационарний супутник.

ВСТУП

Проблема деградації космічного матеріалу в умовах космосу має актуальне фундаментальне та прикладне значення не тільки для конструкторів космічних систем. Характер деградації космічних матеріалів в умовах космосу з використанням наземних фотометричних спостережень поки що слабо вивчено. Авторам ві-

дома лише одна публікація О. В. Діденка [1], у якій приведено результати спостережень зміни відбивної здатності геостационарних супутників (ГСС) із Землі через атмосферу у різних спектральних діапазонах довжин хвиль (B , V , R). З удосконаленням методів спостережень та обробки спостережного матеріалу цей напрямок заслуговує на більшу увагу. Багатоколірна фото-

Цитування: Сухов П. П., Сухов К. П., Павловський О. Л., Мамрай С. А. Фотометричний спосіб визначення деградації поверхні геостационарного об'єкта. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5 (138). С. 75—80. <https://doi.org/10.15407/knit2022.05.075>

метрія та отримані значення показників кольору можуть дати можливість відрізнити космічне сміття від неушкоджених космічних об'єктів, таких як корпуси ракет і супутники.

На космічний апарат (КА), що перебуває на навколосупутничій орбіті, впливає цілий ряд факторів: глибокий вакуум, невагомість, метеорний пил, частинки штучного походження, сонячні спалахи, корпускулярне та електромагнітне випромінювання різних видів, радіаційний пояс Ван Аллена, різкий температурний перепад при вході у тінь Землі та виході із неї тощо. Під дією цих факторів руйнуються механічні кріплення, що використовуються для монтажу платформ, корисного навантаження, елементів сонячних батарей, а також на з'єднання між цими компонентами. Змінюються механічні, оптичні та електрофізичні характеристики матеріалів та елементів космічного апарата. Як наслідок, виникають поломки, що призводить до зменшення терміну активної роботи КА на орбіті.

Лабораторні умови, моделювання не можуть враховувати вплив всіх космічних факторів на поверхню супутника. Так само вони не можуть враховувати вплив земної атмосфери на відбите від поверхні супутника світло. Згідно з висновками роботи В. А. Шувалова [5] «...відносна складність і висока вартість натурних випробувань не дозволяють вважати їх достовірним засобом для детального вивчення впливу факторів навколосупутничого середовища». Як продовження чи доповнення до лабораторного методу автори пропонують використовувати результати наземних багатокольорових фотометричних

спостережень для визначення ступеня деградації поверхні КА.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Автори використовували алгоритм, запропонований О. В. Діденком, в якому попередньо обчислювалися спектральні коефіцієнти відбиття $\gamma_B, \gamma_V, \gamma_R$ у відповідних спектральних смугах [1]. Ці величини легко визначити з фотометричних спостережень:

$$\gamma_\lambda = d^2 \cdot 10^{\frac{m_\lambda^\odot - m_\lambda}{2.512}} \cdot \sec \psi / S,$$

де γ_λ — спектральний коефіцієнт відбиття, m_λ — реєстрований блиск КА у конкретному спектральному діапазоні, m_λ^\odot — зоряна величина Сонця у відповідному спектральному діапазоні, S — видима для спостерігача поверхня КА, освітлена Сонцем, ψ — супутникоцентричний фазовий кут, d — топоцентрична відстань до КА.

На кінцевому етапі обчислювалися відносні коефіцієнти відбиття $\Delta_{(B-V)}$ і $\Delta_{(V-R)}$ для кожної ночі спостережень протягом кількох років.

О. В. Діденко за період чотири з половиною роки спостерігав різні класи ГСС, запущені в кінці 20-го і на початку 21-го століття: «Горизонт», «Радуга» та «Інтелсат» і отримав такі висновки:

- 1) найбільші зміни у відбивних характеристиках поверхні КА відбуваються протягом перших трьох років;
- 2) характер зміни відбивної спроможності для різних супутників різний.

Автори спостерігали ГСС, запущені в другому десятилітті 21-го століття, з моменту почат-

Таблиця 1. Досліджувані геостационарні супутники

Назва ГСС, рік запуску	Призначення	Підрядник	Платформа	Підсупутникова точка	Період спостереження
«Astra 2E» 2013 р.	зв'язок	EADS Astrium	«Eurostar-3000»	30.6° E	2013—2021 рр.
«Sicral 2» 2015 р.	військовий зв'язок	Thales Alenia Space	«Spacebus-4000B2»	40.4° E	2015—2021 рр.
«Azerspace 2» 2018 р.	зв'язок	Space Systems/Loral	SSL-1300	46.9° E	2019—2021 рр.
«Blagovest 11L» 2017 р.	військовий зв'язок	ISS Reshetnev with Thales Alenia Space	«Ekspress-2000»	48.1° E	2017—2021 рр.

ку роботи у підсупутниковій точці і до 2021 р. (табл. 1). У ці роки масово стали використовуватися нові композитні вуглепластикові матеріали, теплозахисні покриття, захисні плівки на сонячних панелях та інші матеріали, стійкіші до впливу космічного середовища.

Спостереження проводилися на 20-дюймовому касегренівському телескопі. Використовувався високошвидкісний фотопомножувач ФЕУ-79, що працює в режимі рахунку імпульсів. Застосовувалися B -, V -, R -фільтри зі смугами пропускання, близькими до широкосмугової фотометричної системи Джонсона — Коузіна.

Всі представлені у табл. 1 ГСС стабілізовані за трьома осями, розташовані поблизу меридіана спостерігача і протягом спостережуваного часу дислокацію не змінювали. Тип космічної платформи, розміри ГСС взято з електронних ресурсів, Gunter Space Page [6], Вікіпедії [7] та з сайту ІСС ім. М. Решетньова [8].

Основними фотоприймальними елементами сонячних панелей (СП) є кремній, сполуки арсеніду галію, фосфіду індію галію та ін. Головне призначення СП — поглинати та перетворити сонячну енергію в електричну. Тому здатність до відбивання сонячних променів сучасних СП дуже мала. Проте через їхню велику площу (від кількох десятків квадратних метрів до більше сотні) вклад відбитого від СП світла у загальний блиск супутника досить великий, а у B -смузі — навіть переважний. Відбивна здатність платформи, її зовнішнього корисного навантаження — дуже велика. Це необхідно для терморегуляції та стабільної роботи бортової радіоелектронної апаратури. Платформи багатьох супутників зв'язку, поверхня антенно-фідерних модулів радіоантен покриваються тонкою жовтою, золотистого кольору плівкою, яка має більший коефіцієнт відбиття γ_λ . У V - і R -смузі вклад у загальний блиск вносять деталі платформ (типу циліндрів, конусів, кубів, паралелепіпедів тощо) та зовнішнього корисного навантаження (службовий модуль та радіоантени різної форми). Також частку відбиття у V - і R -смузі вносять СП, виготовлені на основі сполук арсеніду галію, фосфіду індію галію тощо.

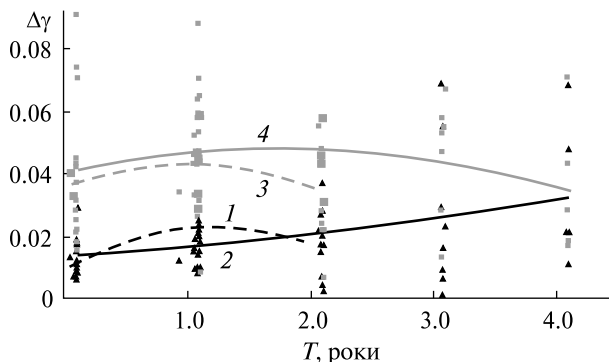


Рис. 1. Зміна відносних коефіцієнтів відбиття $\Delta_{(B-V)}$ (трикутники, криві 1, 2) та $\Delta_{(V-R)}$ (квадратики, криві 3, 4). Криві 1, 3 — для ГСС «Azerspace 2» (платформа SSL-1300) у 2019–2021 рр.; криві 2, 4 — для ГСС «Cosmos 2520»/«Blagovest 11L» (платформа «Express-2000») у 2017–2021 рр.

У публікаціях [2–4, 9, 10] експериментально визначено показники кольору $B - V$ та $V - R$ для деяких космічних матеріалів. На основі цих показників кольору визначити, яку частку відбиття у конкретній спектральній смузі вносять СП з новими фотоприймачами та платформа із зовнішнім корисним навантаженням — питання складне, тому що для кожного конкретного супутника потрібно знати: а) ефективну площу відбиття — S_λ , яка визначається із спостережень; б) спектральний коефіцієнт відбиття γ_λ , величина якого, як правило, дослідникам недоступна та невідома.

На рис. 1 показано зміну відносних коефіцієнтів відбиття $\Delta_{(B-V)}$, $\Delta_{(V-R)}$ ГСС «Azerspace 2» та «Cosmos 2520»/«Blagovest 11L» з часом від початку роботи у «підсупутниковій точці» і включно до 2021 р.

Платформа SSL-1300 (Structure, Composite & Al honeycomb) почала вироблятися з 1989 р., а «Express-2000» — з 2014 р. Слід зазначити, що зниження оптичних характеристик «Azerspace 2» з платформою SSL-1300 спостерігається протягом першого року. Тобто, його поверхня стійкіша до умов космічного середовища, ніж поверхня «Cosmos 2520» з платформою «Express-2000».

Платформа «Eurostar-300» виготовляється з 2004 р., а «Spacebus-400B2» — з 1985 р. Поміт-

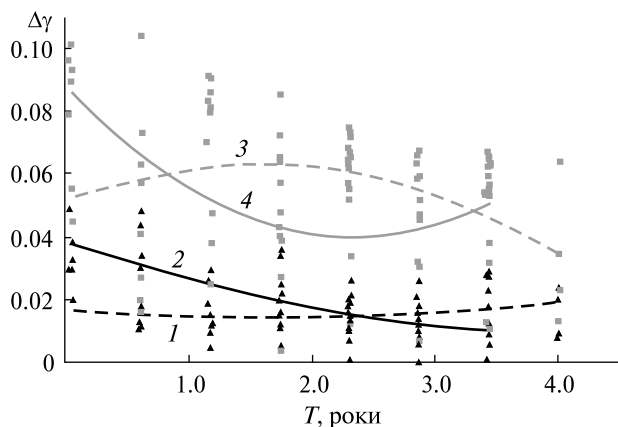


Рис. 2. Зміна відносних коефіцієнтів відбиття $\Delta_{(B-V)}$ (трикутники, криві 1, 2) та $\Delta_{(V-R)}$ (квадратики, криві 3, 4). Криві 1, 3 — для ГСС «Astra 2» (платформа «Eurostar-3000») у 2013–2021 рр.; криві 2, 4 — для ГСС «Sicral-2» (платформа «Spacebus-4000B2») у 2015–2021 рр.

но, що для «Eurostar-300» найбільші зміни $\Delta_{(V-R)}$ відбуваються у перші три роки, коли відповідний коефіцієнт Δ збільшується від 0.05 до 0.065. Значення $\Delta_{(B-V)}$ для цієї платформи практично не змінюються перші три роки. Для супутника «Sicral-2» («Spacebus-4000B2») цікавий протилежний хід кривих $\Delta_{(B-V)}$ та $\Delta_{(V-R)}$. Це дивовижно.

Спостереження проводились у широкосмуговій фотометричній системі Джонсона — Коузіна з півшириною смуги пропускання близько 300 нм. Відповідно хід кривих на рис. 1 та 2 дають лише загальну характеристику зміни відбивних властивостей поверхні КА. Внаслідок цього поки неможливо визначити, які саме космічні матеріали змінювали свої оптичні якості протягом спостережного часу. Для цього потрібні спостереження у вузьких спектральних смугах з півшириною смуги менше 10 нм, або отримання та аналіз деталей спектру.

Представлені результати викликають інтерес до продовження фотометричних спостережень ГСС на інтервалі 10...15 років.

ВИСНОВКИ

Представлено результати використання експериментальних даних для визначення деградації оптичних характеристик поверхні ГСС від часу активної роботи ГСС на орбіті.

На основі аналізу цих даних можна зробити такі висновки.

1. З чотирьох ГСС з різними типами платформи не виявлено ГСС, який має значні переваги щодо стійкості оптичних характеристик зовнішньої поверхні до впливу космічного середовища. Характер зміни відбивної спроможності для ГСС — різний. Це природно, бо різні типи СП та платформ використовують різні матеріали покриття.

2. Відбивна здатність поверхні ГСС, виготовлених у другому десятилітті 21-го століття, більш стійка до впливу космічного середовища, ніж відбивна здатність поверхонь супутників, виготовлених наприкінці 20-го століття. Це наслідок технічного прогресу у використанні нових полімерних композиційних матеріалів, теплозахисних покриттів, легких каркасів радіоантен, каркасів сонячних панелей з вуглепластику (карбон), сонячних панелей на основі GaAs, сполук титану тощо. Ці матеріали стійкіші до умов космічного середовища.

3. Відносні коефіцієнти $\Delta_{(B-V)}$, $\Delta_{(V-R)}$ відображають інтегральний характер зміни відбивних характеристик поверхні КА. За цими коефіцієнтами неможливо визначити матеріал поверхні КА, який змінив відбивну здатність.

4. Для визначення матеріалу, який змінив відбивні властивості, потрібно використовувати середньосмугові чи вузькосмугові фільтри. Надалі цей метод потребує вдосконалення.

5. Порівнюючи зміну відбивних характеристик типів платформ різних підприємств, компаній-виробників супутників, можна оцінити якість та науково-технічний прогрес цих підприємств.

6. Багатоколірні фотометричні дослідження поверхні супутника значно дешевші за лабораторні. Цей метод більш достовірно відображає вплив космічного середовища на поверхню супутника, оскільки фотометричний спосіб реєструє сумарний вплив всіх космічних факторів навколосупутникового середовища.

У фотометричній базі даних геостационарних об'єктів Одеської астрономічної обсерваторії є багаторічний спостережний матеріал з 190 геостационарних об'єктів з різними типами платформ. За цими даними можна будувати аналогічні залежності для окремих ГСС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Диденко А. В. О влиянии старения покрытий космического аппарата на его фотометрические характеристики. *Вестник КазНПУ им. Абая. Сер. Физ.-мат. науки*. 2005. № 1(12). С. 81—84. URL: <http://astronomer.ru/publications.php?act=view&id=168> (дата звернення: 20.05.2022).
2. Єпішев В. П., Барна І. В., Кудак В. І., Періг В. М., Габдеев М. М. Багатоколірна фотометрія геостационарних об'єктів. *Науч. вестник Ужгородского ун-та. Сер. Физика*. 2017. Вып. 41. С. 132—139. DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.132-139.
3. Єпішев В. П., Кудак В. І., Павлюк М. М., Періг В. М. Дослідження поверхневих характеристик геостационарних супутників за даними колориметрії. *Науч. вестник Ужгородского ун-та. Сер. Физика*. 2017. Вып. 41. С.146—152. DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.146-152.
4. Муртазов А. К. *Оптические свойства поверхностей ИКО и техногенных отходов в космосе*. Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. М.: Космосинформ, 2000. С. 262—268.
5. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С., Носиков С. В. Потери мощности солнечных батарей космического аппарата в полярной ионосфере и в магнитосфере Земли. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17, № 3. С. 5—15. <https://doi.org/10.15407/knit2011.03.005>
6. Gunter Space Page. URL: <https://space.skyrocket.de/cgi-bin/search.pl> (дата звернення: 20.05.2022).
7. Астра 2Е. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Астра_2Е (дата звернення: 20.05.2022).
8. Спутниковая платформа «Экспресс-2000». URL: https://www.russianspaceweb-com.translate.google.com/Ekspress-2000.html?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (дата звернення: 20.05.2022).
9. Cowardin H., Seitzer P., Abercromby K., Barker E., Schildknecht T. Characterization of orbital debris photometric properties derived from laboratory-based measurements. *NASA Technical Reports Server*. 2010. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110015517> (дата звернення: 20.05.2022).
10. McCue G. A., Williams J. G., Morford J. M. Optical Characteristics of artificial satellites. *Planet. Space Sci.* 1971. 19. P. 851—868. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(71\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(71)90137-1)

REFERENCES

1. Didenko A. V. (2005). On the effect of spacecraft coating aging on its photometric characteristics . *Vestnik KazNPU im. Abaya, Ser. Fiz –mat. nauki*, № 1(12), 81—84. URL: <http://astronomer.ru/publications.php?act=view&id=168> (Last accessed: 20.05.2022).
2. Epishev V., Barna I., Kudak V., Perig M., Gabdeev M. (2017). Multicolor photometry of geostationary objects. *Scientific Herald of Uzhhorod Univ. Ser. Phys.*, № 41, 132—139. doi: 10.24144/2415-8038.2017.41.132-139
3. Epishev V., Kudak V., Pavluk M., Perig M. (2017). Investigation of surface characteristics of geostationary satellites according to colorimetric data. *Scientific Herald of Uzhhorod Univ. Ser. Phys.*, № 41, 146—152. doi: 10.24144/2415-8038.2017.41.146-152.
4. Murtazov A. K. (2000). *Optical properties of surfaces of ICO and man-made waste in space*. Near-Earth astronomy and problems of studying small bodies of the solar system. M.: Kosmosinform, 262—268.
5. Shuvalov V. A., Pismenny N. I., Kochubey G. S., Nosikov S. V. (2011). Power losses for solar arrays of a spacecraft in the Earth's polar ionosphere and magnetosphere. *Space Science and Technology*, 17, № 3, 5—15. <https://doi.org/10.15407/knit2011.03.005>
6. Gunter Space Page. URL: <https://space.skyrocket.de/cgi-bin/search.pl> (Last accessed: 20.05.2022).
7. Astra-2E. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Астра_2Е (Last accessed: 20.05.2022).
8. Ekspress-2000 satellite platform. URL: https://www.russianspaceweb-com.translate.google.com/Ekspress-2000.html?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (Last accessed: 20.05.2022).
9. Cowardin H., Seitzer P., Abercromby K., Barker E., Schildknecht T. (2010). Characterization of orbital debris photometric properties derived from laboratory-based measurements. *NASA Technical Reports Server*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110015517> (Last accessed: 20.05.2022).
10. McCue G. A., Williams J. G., Morford J. M. (1971). Optical characteristics of artificial satellites. *Planet. Space Sci.*, 19, 851—868. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(71\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(71)90137-1)

Стаття надійшла до редакції 20.05.2022

Після доопрацювання 15.06.2022

Прийнято до друку 25.06.2022

Received 20.05.2022

Revised 15.06.2022

Accepted 25.06.2022

*P. P. Sukhov*¹, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

E-mail: psukhov@ukr.net

*K. P. Sukhov*², Junior Researcher, Programmer

E-mail: sppete@ukr.net

*A. L. Pavlovskyi*², Head of Space Situation Monitoring Department of NTSUVCTC

E-mail: pal2978@bigmir.net

*S. A. Mamray*², Head of Laboratory for Maintaning the Head Catalog and analysis of the Space Situation

E-mail: sergan1502@gmail.com

¹ Astronomical Observatory of the I. Mechnikov Odessa National University

1b, Marazliyivska Str., Odesa, 65122 Ukraine

² National Space Facilities Control and Testing Centre, Space Observation Center

40, Pushkinska Str., Zhytomyr, 10002 Ukraine

PHOTOMETRIC METHOD FOR DEGRADATION SURFACE DETERMINATION OF A GEOSTATIONARY OBJECT

We propose a new method of using photometric data for determining the degradation of the optical parameters of the GSS surface since the GSS's active operation in orbit. Experimental data on changes in the coefficients of spectral reflection (degradation) of the surface of several geostationary satellites with different types of space platforms over several years are presented. Data were obtained from ground-based photometric observations in filters *B*, *V*, and *R*. Among studied satellites, there are „As-tra 2E” (bus Eurostar-3000), „Azerspace 2/Intelsat 38” (bus SSL-1300), „Sicral 2” (bus Spacebus-4000B2), „Cosmos 2520/Blagovest 11L” (bus Ekspress-2000). It was revealed that the nature of the change in the surface reflectivity for the different satellites differs. Space materials on the surface of geostationary satellites manufactured in the second decade of the 21st century demonstrate that their surface is more resistant to the aggressive space environment than that of the satellites manufactured in the late 20th century. Methods for determining the type of space material and its color in different spectral bands using multicolor photometric observations are proposed. As a continuation or addition to the laboratory method, the authors propose to use the results of ground-based multicolor photometric observations to determine the degree of degradation of the spacecraft's surface.

Keywords: space material, degradation, reflective characteristics, *B*, *V*, *R* photometric, space bus.