

Моніторинг космічного простору і космічне сміття

Space Environment Monitoring and Space Debris

<https://doi.org/10.15407/knit2023.02.086>
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, 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, наук. співроб.
E-mail: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

І. Ф. НАЙБАУЕР¹, інж. I кат.
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

П. П. ГУРАНИЧ¹, доц. каф. оптики, зав. кафедри оптики, канд. фіз.-мат. наук
E-mail: pavlo.guranich@uzhnu.edu.ua

А. І. СУСЛА¹, викладач каф. оптики
E-mail: anatoliy.susla@uzhnu.edu.ua

М. І. КОШКІН², старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
E-mail: nikkoshkin@yahoo.com

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

²Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»
Одеського національного університету ім. І. І. Мечнікова
вул. Маразліївська буд. 1 В, Одеса, Україна, 65014

АНАЛІЗ ФОТОМЕТРІЇ СУПУТНИКА «СІЧ-2» НА БАГАТОРІЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

17 серпня 2011 року з пускової бази «Ясний» здійснено пуск ракети-носія «Дніпро», яка вивела на навколосезну орбіту супутник «Січ-2». Українські станції оптичних спостережень одразу почали записувати фотометричні криві блиску супутника. У середині 2012 року було встановлено, що КА «Січ-2» має певний період обертання навколо власної осі і можливо вийшов з ладу. Це було підтверджено пізніше офіційними джерелами. На основі багаторічних спостережень штучного супутника Землі «Січ-2» з пунктів Ужгород і Одеса було досліджено його поведінку на орбіті з моменту запуску і по 2022 рік. В роботі розкрито можливості фотометричного методу у поєднанні з позиційними даними в області досліджень динаміки обертання космічних апаратів, що мають три ступені свободи і складні конструктивні особливості поверхонь. У роботі отримано, що вісь власного обертання КА «Січ-2» збігається з його вертикальною віссю, яка прецесує навколо напрямку «центр ШСЗ — центр Землі». Визначено, що пара протилежних ПСБ розміщуються перпендикулярно одна до одної. Розраховано величину орбітального періоду супутника $P_{\text{орб}} = 99.5$ хв та встановлено середнє значення періоду прецесії $P_{\text{пр}} = 90.5$ с. Проаналізовано зміну періоду власного обертання КА «Січ-2», який на інтервалі 9 років після дестабілізації

Цитування: Єпішев В. П., Кудак В. І., Мотрунич І. І., Періг В. М., Найбауер І. Ф., Гураніч П. П., Сусла А. І., Кошкін М. І. Аналіз фотометрії супутника «Січ-2» на багаторічному інтервалі спостережень. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 2 (141). С. 86—96. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.086>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

супутника змінювався в межах $P_0 = 11.95...3.63...5.06$ с. Також встановлено, що період прецесії за цей же час змінювався у межах $P_{пр} = 71...234...226$ с. Кут прецесії осі обертання відносно напрямку з центра супутника до центра Землі лежить у межах $38^\circ...28^\circ$.

Ключові слова: штучний супутник Землі, орієнтація, методика, фотометрія, панелі сонячних батарей, прецесія осі обертання.

ВСТУП

В 2011 році 17 серпня о 10 год 12 хв 20 с за київським часом з пускової бази «Ясний» за безпосередньої участі українських спеціалістів було здійснено пуск ракети-носія «Дніпро», яка вивела на навколосемну орбіту супутник «Січ-2». Запуск космічного апарата присвячено 100-річчю від дня народження Михайла Кузьмича Янгеля, першого керівника Конструкторського бюро «Південне» протягом 18 років.

Після виходу з ладу супутника в 2012 р. оптичними станціями Ужгорода та Одеси було організовано регулярні фотометричні спостереження з метою визначення періоду власного обертання та орієнтації даного об'єкта.

Визначення орієнтації і її змін для будь-якого космічного об'єкта (КО) у вибраній системі координат на основі пасивних наземних спостережень за ним є однією із найскладніших задач у системі моніторингових заходів. Тут немає однозначного підходу до спостережуваних проявів відбиття світла від різноманітних поверхонь [1–2]. Практика показує, що розв'язок такого складного питання слід розділити як мінімум на дві складові. Перша — розв'язок базується на аналізі дзеркального відбиття світла [9], друга — на основі дифузного розсіювання світла поверхнею КО [6].

Методика визначення орієнтації штучного супутника Землі (ШСЗ) у випадку дзеркального відбивання світла, яку було використано у процесі дослідження динаміки обертання дестабілізованого космічного апарата (КА) «Січ-2», не залежить від конструкції і положення відбивальних ділянок відносно його головних осей або осі його власного обертання [3]. Головна умова в цьому випадку — це наявність у відбитому від супутника світловому потоці короткочасних дзеркальних спалахів. Здійснювані в Лабораторії космічних досліджень УжНУ та Астрономічній

обсерваторії ОНУ фотометричні спостереження різнопланових КА показали, що серед них є досить велика кількість таких об'єктів [10, 12]. Відбивати дзеркально можуть панелі сонячних батарей (ПСБ), об'єкти телескопів, кутикові відбивачі, параболічні радіоантени та гладкі ділянки їхніх поверхонь. Отримані на момент спалаху значення напрямків від об'єкта на спостерігача та Сонце дають можливість встановити координати відбивача у будь-якій системі координат, а за ними, при достатній кількості інформації, — положення ШСЗ в просторі. Тому основу застосованої методики складають результати синхронних фотометричних і позиційних спостережень КА в достатній кількості для кожного окремого об'єкта. Поняття «в достатній кількості» конкретизується у процесі розв'язування поставленої задачі.

В свою чергу, аналіз орієнтації об'єкта, визначений за напрямками дзеркально відбитого світла, допомагає встановити положення дзеркальних ділянок поверхні КО до його головних осей, а саме — як розкрилися ПСБ, яке їхнє положення на момент спостережень, куди направлені антени або об'єктиви. Крім того, встановлення змін в орієнтації ШСЗ на тривалих відрізках часу розкриває характер динаміки його поведінки на орбіті і часто причини таких змін. На наш погляд, результати спостережень дестабілізованого КА «Січ-2» протягом 10 років досить об'єктивно відображають можливості застосованої методики досліджень та характер поведінки на низьких орбітах об'єктів, подібних до цього ШСЗ.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ОБЕРТАННЯ СУПУТНИКА «СІЧ-2» НА ІНТЕРВАЛІ 10 РОКІВ

Спостереження ШСЗ «Січ-2» (рис. 1, а) в Ужгороді і Одесі розпочалися практично одразу після його виведення на робочу орбіту в серпні 2011 року. Результати спостережень підтвердили ста-

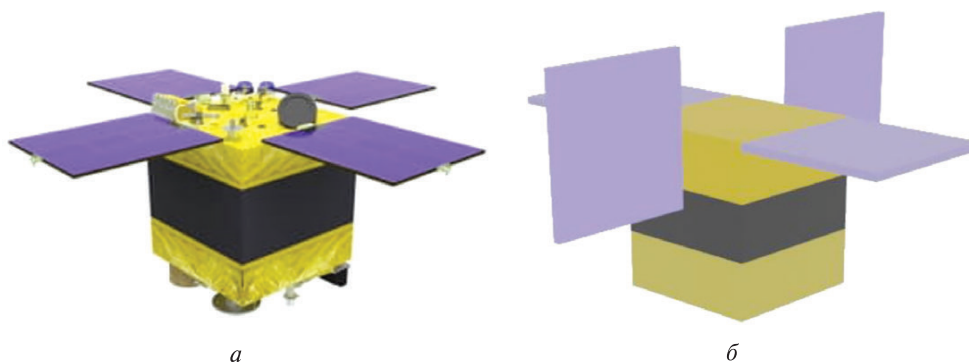


Рис. 1. Загальний вигляд ШСЗ «Січ-2»: а — плановане розміщення панелей, б — розміщення панелей відповідно до отриманих результатів

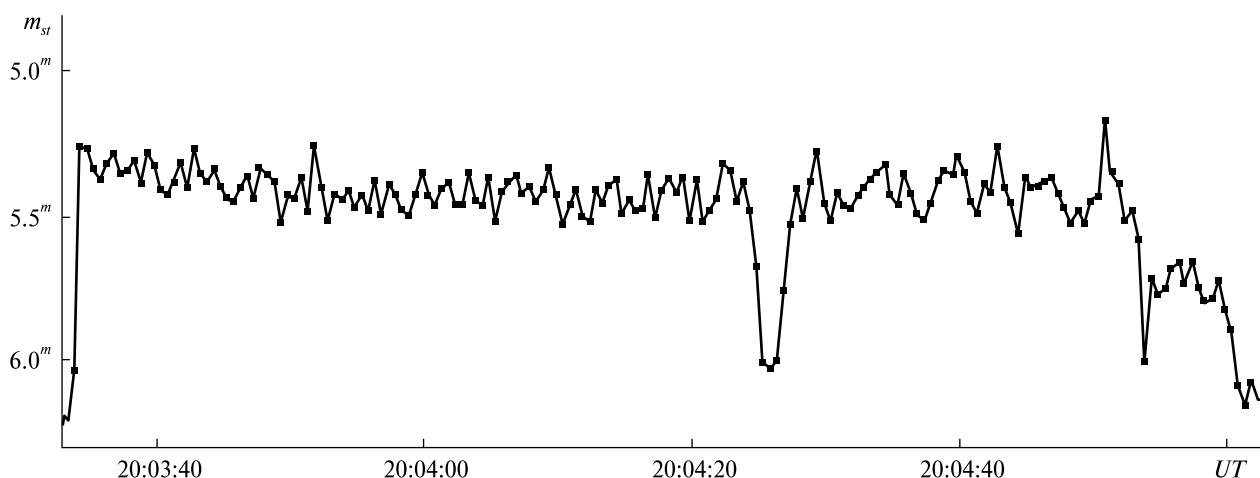


Рис. 2. Крива зміни блиску ШСЗ «Січ-2», отримана у спектральній смузі V у пункті Ужгород 17.08.2011 р.

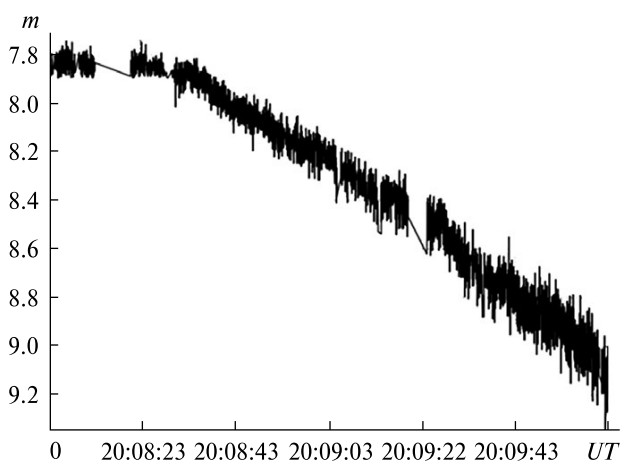


Рис. 3. Крива зміни блиску ШСЗ «Січ-2», отримана в інтегральному світлі у пункті Одеса 22.08.2011 р., без поправок за зміну віддалі до об'єкта

білізацію КО на орбіті (рис. 2, 3) і його орієнтацію у бік земної поверхні. Відмінності форм кривих блиску на рис. 2, 3 зумовлені тим, що в Ужгороді для приймання світлових потоків у каналах B , V використовуються фотопомножувачі ФЕП-79, а в Одесі — ПЗЗ-матриця.

У середині 2012 року КА «Січ-2» вийшов з ладу і почав обертатися навколо власної осі. У роботі [14] приведено результати визначення періоду власного обертання, отримані в 2012...2013 рр., проте ми не маємо цих даних в розпорядженні і не можемо їх використати, але наші данні спостережень перекривають цей часовий інтервал.

Для аналізу подальшого стану об'єкта на орбіті ми включили результати його спостережень з квітня 2013 р. до червня 2018 р. в Одесі [10], і

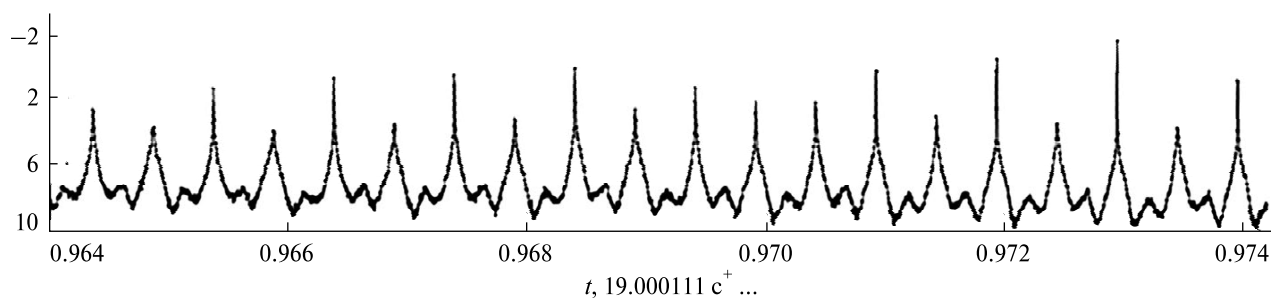


Рис. 4. Фрагмент кривої блиску ШСЗ «Січ-2», отриманої в інтегральному світлі в пункті Одеса 11.05.2018 р.

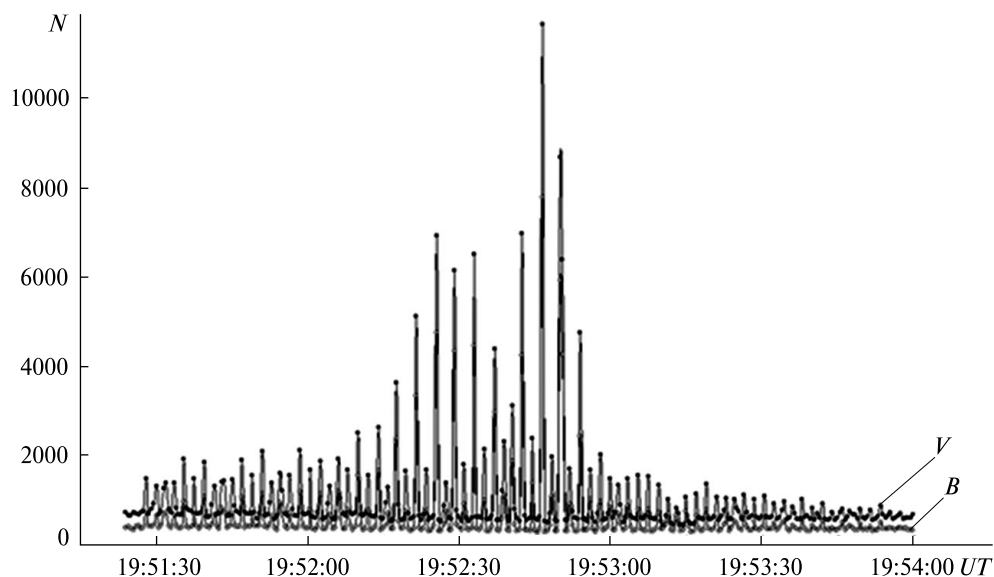


Рис. 5. Крива зміни блиску ШСЗ «Січ-2», отримана у спектральних смугах B , V у пункті Ужгород 27.04.2020 р.

з липня 2013 р. до листопада 2022 р. в Ужгороді. В основному ці спостереження провадилися кожного року з квітня по серпень, коли наступав сезон найкращої вечірньої видимості об'єкта на орбіті. Відібрано 40 кривих блиску, 25 з яких отримано в Одесі і 15 — в Ужгороді, що дозволяло чітко визначити період власного обертання об'єкта. На рис. 4, 5 приведено дві такі криві блиску, з яких видно, що даний супутник має власне обертання.

Аналіз кривих блиску, отриманих в Одесі, показує, що супутник досяг мінімального періоду 3.64 с власного обертання в липні 2018 року, а полюс осі обертання мав напрямок $\alpha_{rot} = 56^\circ$,

$\delta_{rot} = 75.7^\circ$. Автори вже тоді припускали наявність прецесії, але величину періоду прецесії не визначали [11].

Тривалий моніторинг поведінки даного об'єкта показав, що це обертання протягом 2013 р. досить швидко прискорювалось, потім практично стабілізувалось, а в 2018 р. почало проявляти признаки гальмування (рис. 6, табл. 1), яке продовжується до кінця 2022 р. За цей час прецесійний період обертання змінювався у межах $P_{пр} = 71.0 \dots 234.0 \dots 226.0$ с. Значення періодів власного обертання були визначені за допомогою відомого в астрономії методу Ломба — Скаргла [13, 16].

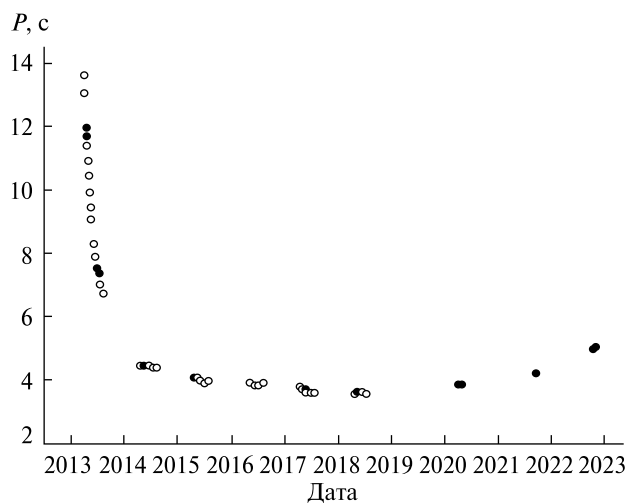


Рис. 6. Зміна видимого періоду власного обертання ШСЗ «Січ-2»: кружки — дані вимірювань в Одесі, точки — в Ужгороді

Таблиця 1. Зміни періоду власного обертання КА «Січ-2» на річних інтервалах

Інтервали спостережень, роки	Період власного обертання, с
2013	13.50...5.50
2014	5.50...5.15
2015	5.15...4.00
2016	4.00...3.85
2017	3.85...3.70
2018	3.70...3.63
2020	3.63...3.68
2022	4.23...5.06

ОТОТОВЖЕННЯ ДЗЕРКАЛЬНИХ ДІЛЯНОК І ЇХНЄ РОЗТАШУВАННЯ НА ПОВЕРХНІ ДЕСТАБІЛІЗОВАНОГО СУПУТНИКА «СІЧ-2»

Головним джерелом інформації, на якій базується визначення орієнтації, є відбите від поверхні ШСЗ сонячне світло. Його реєстрація дозволяє визначити як положення КА на орбіті, так і окремі характеристики конструкцій їхніх поверхонь. За результатами позиційних спостережень ШСЗ визначаються необхідні в цьому випадку напрямки «спутник — спостерігач», «спутник — Сонце», «спутник — центр Землі», елементи орбіти досліджуваного об'єкта на момент спостережень. Фіксація моменту дзеркального від-

бивання світла від поверхні КА з експозиціями 0.1...0.3 с може забезпечити точність визначення орієнтації високостабілізованих об'єктів до 0.1°, а дестабілізованих КА — до 1.5°. Таку точність в даний час для низькоорбітальних супутників забезпечують ефемеридні данні з каталогів типу NORAD. Тому з похибкою такого ж порядку точності розраховуються і напрямки з центра супутника до спостерігача, Сонця та центра Землі, а також відповідні кути освітлення і відбивання світлового променя від поверхні КА. Об'єднання такого рівня інформації з параметрами власного і прецесійного обертання КА є базовим для дослідження, виявлення і оцінки джерел збурень з боку фізичних полів навколоземного космічного простору на рух ШСЗ на різних висотах.

Фотометрія дає інформацію про характер розсіювання світла поверхнею КА, наявності дзеркальної чи дифузної складової у відбитому поверхнею ШСЗ світлі, моментів дзеркального спалаху, його потужності, тривалості і частоти, різновидності поверхневих конструкцій об'єкта.

Дзеркальні спалахи блиску КА «Січ-2» спостерігалися не під час всіх його проходжень. Навіть тоді, коли на перший погляд зміна блиску на кривій виглядала як дзеркальна, насправді вона була квазідзеркальною. Використання таких спалахів для визначення орієнтації осі власного обертання об'єкта та інших дзеркальних конструкцій його поверхні значно погіршували кінцевий результат оцінки динаміки поведінки супутника на орбіті. Тому для дослідження змін в орієнтації супутника було відібрано 10 кривих блиску, на яких зафіксовано найбільш потужні дзеркальні спалахи. Через те що саме в такі моменти найкраще виконуються умови дзеркального відбивання світла, і, відповідно, напрямок нормалі до відбивальної поверхні визначався з найменшою похибкою. Внаслідок швидкого власного обертання КО та прецесії осі обертання на окремих кривих блиску встигло проявитися ще кілька спалахів меншої потужності (рис. 5), які практично вже можна вважати квазідзеркальними. Тому надалі визначені на ці моменти напрямки нормалей розглядалися як допоміжна інформація.

Ключовим питанням у процесі досліджень стало ототожнення природи дзеркальних ділянок

поверхні ШСЗ і їхнього розміщення відносно осі обертання КА, а також напрямку «супутник — центр Землі», який розміщений у площині орбіти супутника. У Лабораторії космічних досліджень УжНУ розроблено програмне забезпечення «Орієнтація», що дозволяє визначити напрямки нормалей та допоміжні кути до них, базуючись на позиційній інформації положення на орбіті КА у момент спостережень. Дане програмне забезпечення знайшло застосування при визначенні орієнтації багатьох КА, наприклад MIDAS 3-7, Торех/Poseidon, AJISAI та інших [4, 7, 12].

Ототожнити дзеркальні конструкції допомогли результати колориметричних спостережень супутника в Ужгороді у полосах B , V . Протягом часу, коли КА був стабілізований, і спостерігач бачив в основному нижню його частину і деякі бокові грані, дзеркальні спалахи не спостерігалися, а колор-індекс $C = B - V$ з кривих блиску (рис. 2, 3) дорівнював 1.90^m , що свідчило про видиму темну і шорстку поверхню. Коли супутник перейшов у дестабілізований стан, у моменти потужних дзеркальних спалахів показник дорівнював $C = -0.40^m$. Таке значення колор-індексу притаманне панелям сонячних батарей [15]. Їхнє розташування на поверхні ШСЗ у момент переходу супутника в дестабілізований режим визначалося за позиційними даними через напрямки нормалей у моменти дзеркальних спалахів відносно напрямку «супутник — центр Землі» згідно з формулою (7) з роботи [12]:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} =$$

$$[(x_0+x_C)^2 + (y_0+y_C)^2 + (z_0+z_C)^2]^{-1/2} \times \begin{pmatrix} x_0 + x_C \\ y_0 + y_C \\ z_0 + z_C \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де

$$x_0 = \cos\alpha_0 \times \cos\delta_0,$$

$$y_0 = \sin\alpha_0 \times \cos\delta_0,$$

$$z_0 = \sin\alpha_0,$$

— напрямок з центра супутника до центра Сонця, а

$$x_C = \cos\alpha_C \times \cos\delta_C,$$

$$y_C = \sin\alpha_C \times \cos\delta_C,$$

$$z_C = \sin\alpha_C,$$

— напрямок із центра супутника до спостерігача; α_0 і δ_0 , α_C і δ_C — відповідно координати Сонця і спостерігача в екваторіальній супутникоцентричній системі координат. Останні обчислюються за результатами синхронних позиційних спостережень.

З приведених вище рівнянь визначаємо α_n , δ_n :

$$\alpha_n = \arctg \frac{x_n}{y_n}, \quad \delta_n = \arcsin z_n, \quad (2)$$

де α_n і δ_n — супутникоцентричні екваторіальні координати напрямку нормалі до ділянки поверхні КА, яка відбиває дзеркально.

Кути падіння і відбивання світла від КА та нахил нормалей до напрямку «супутник — центр Землі» і кут прецесії розраховувались за відомою формулою косинусів. У табл. 2 представлено: дату спостережень, зареєстровані моменти UT найпотужніших дзеркальних спалахів на окремих кривих, супутникоцентричні екваторіальні координати α_g і δ_g напрямку «супутник — центр Землі», супутникоцентричні координати α_{n1} , δ_{n1} , α_{n2} і δ_{n2} напрямків нормалі від першої та другої з двох дзеркальних ділянок поверхні ШСЗ, кути ν_1 і ν_2 нахилу напрямків нормалей від дзеркальних ділянок поверхні до напрямку «супутник — центр Землі», кут β між віссю власного обертання ШСЗ та напрямком «супутник — центр Землі», він же кут прецесії, назви пунктів, де було записано криві блиску.

З наведених в таблиці значень кутів ν_1 і ν_2 видно, що дзеркальних ділянок на поверхні ШСЗ є дві, і вони, за цими нашими розрахунками, розміщені одна відносно одної під кутом приблизно 90° . Пам'ятаємо, що кути ν_1 і ν_2 відображають нахил нормалей до дзеркальних ділянок відносно напрямку «центр супутника — центр Землі», який перебуває у площині орбіти. У випадку кута ν_1 нормаль \mathbf{n}_1 переважно була напрямлена вліво від площини орбіти ($\alpha_n < \alpha_g$), а кута ν_2 — вправо від орбіти ($\alpha_n > \alpha_g$). Отже загальна сума їхніх значень близька до 90° . Чотири грані корпусу супутника покрито теплоізоляційним матеріалом, який не в змозі відбивати світло дзеркально. І це добре видно на лівій половині приведеної кривої

Таблиця 2. Результати розрахунку орієнтації ШСЗ «Січ-2»

Дата	UT	α_g	δ_g	α_{n1}	δ_{n1}	α_{n2}	δ_{n2}	ν_1	ν_2	β	Примітка
02.07.13	20 ^h 20 ^m 56 ^s	75.7°	-44.9°	103.8°	4.5°				55.6°	35.0°	Ужгород
02.07.13	20 ^h 21 ^m 17 ^s	45.8°	-46.2°	104.6°	2.0°				52.4°	37.5°	Ужгород
16.05.14	20 ^h 37 ^m 21 ^s	28.2°	-48.1°			21.2°	-18.2°	30.2°		30.2°	Одеса
19.05.14	20 ^h 55 ^m 50 ^s	33.1°	-43.3°	41.5°	7.8°				52.0°	38.0°	Ужгород
20.05.14	21 ^h 35 ^m 25 ^s	33.2°	-49.6°	24.3°	8.8°				53.3°	36.7°	Ужгород
29.05.17	20 ^h 16 ^m 24 ^s	37.6°	-46.7°			38.4°	-12.8°	33.7°		33.7°	Одеса
04.07.17	20 ^h 27 ^m 38 ^s	71.5°	-50.3°			63.6°	-22.4°	29.0°		29.0°	Одеса
27.04.20	19 ^h 52 ^m 48 ^s	49.3°	-48.6°			353.5°	-16.3°	32.6°		32.6°	Ужгород
13.10.22	17 ^h 13 ^m 35 ^s	128.4°	-45.5°	178.0°	-13.9°				52.2°	37.8°	Ужгород
27.10.22	17 ^h 53 ^m 00 ^s	142.2°	-43.5°			166.3°	-12.5°	37.0°	52.2°	37.0°	Ужгород

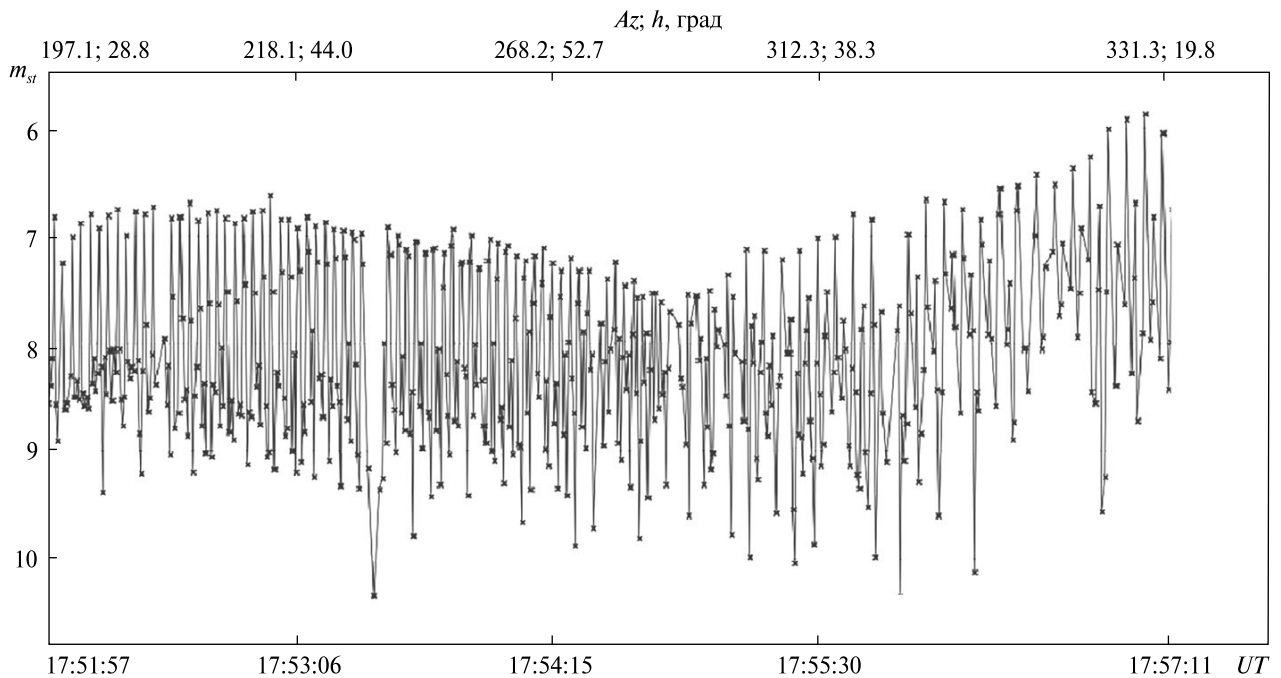


Рис. 7. Крива зміни блиску ШСЗ «Січ-2», отримана у смузі R у пункті Деренівка 27.10.2022 р.

блиску (рис. 5). Дзеркально відбивати світло могли панелі сонячних батарей, які на даному КА у моменти спостережень були розташовані попарно та хрестоподібно.

Якщо одна пара ПСБ розташована на КА, як видно на рис. 1, то інша тоді повинна бути розвернутою навколо його поперечної осі на 90° до цієї пари. Звідси у першій парі ПСБ напрямком нормалі (\mathbf{n}_1) буде збігатися з напрямком по-

вздовжньої осі zz' супутника, яка штучно збільшується у такого класу ШСЗ викидом штанги для покращення його робочої стабілізації на орбіті. А напрямком нормалі \mathbf{n}_2 до іншої пари ПСБ становитиме практично 90° до цієї осі і перебуватиме в одній площині з двома протилежними гранями корпусу ШСЗ (рис. 1, б).

Саме цим можна пояснити збільшення блиску на першій половині кривої блиску (рис. 5) як

сумарного від цієї пари ПСБ і від однієї з чотирьох граней корпусу об'єкта. Практично від цієї пари ПСБ на кривій проявилось кілька малопотужних квазідзеркальних спалахів, за якими напрямком нормалі визначався з великою (понад 20 %) похибкою. Найбільш потужний спалах був зареєстрований від іншої пари ПСБ, нормаль до яких збігалася з напрямком повздовжньої осі zz' КА «Січ-2» а кут $\nu_1=32.64^\circ$ відображав уже і нахил осі власного обертання до напрямку «супутник — центр Землі» у момент спостережень.

У випадку дестабілізації більшість КА розкручуються саме навколо повздовжньої осі, яка в свою чергу, внаслідок прецесії, обертається навколо вектора центральної сили, що діє на супутник на орбіті і збігається з напрямком «супутник — центр Землі»[5]. Прояв у даному випадку прецесії осі власного обертання супутника «Січ-2» добре видно з кривої, отриманої 27.10.2022 р. (рис. 7).

Тут період власного обертання КА ($P_o = 5.06$ с) дорівнює величині проміжків між окремими дзеркальними спалахами на початку і в кінці кривої блиску, а прецесійний — проміжком вздовж всієї кривої між максимумами блиску КА на інтервалі $UT = 17^h51^m57^s \dots 17^h57^m10^s$ і мінімальним його значенням в $UT = 17^h55^m02^s$. Саме завдяки прецесії осі власного обертання ШСЗ можна пояснити появу на кривій періодичних через 61.7 с пропусків блиску, коли в поле зору спостерігача попадало чергове ребро між його чотирма поверхневими гранями, що і призводило до різкого зменшення блиску. Встановлена зміна власного і прецесійного періодів обертання КА «Січ-2» протягом 10 років підтверджує саме такий характер його поведінки на орбіті. Схематично поведінку і орієнтацію КА відображено на рис. 8.

Таке обертання ШСЗ відповідає класичній поведінці відомої дзиги в гравітаційному полі. Кут ν_1 в такому випадку буде відповідати куту прецесії осі обертання β , що представлено в табл. 1. Те, що саме кут ν_1 , а не ν_2 , відповідає куту прецесії, підтверджується дослідженнями, де показано, що при досягненні кута $\beta > 53 \dots 55^\circ$ супутник переходить в так званий режим «довільного перекидання», тобто в режим, що нагадує на пер-

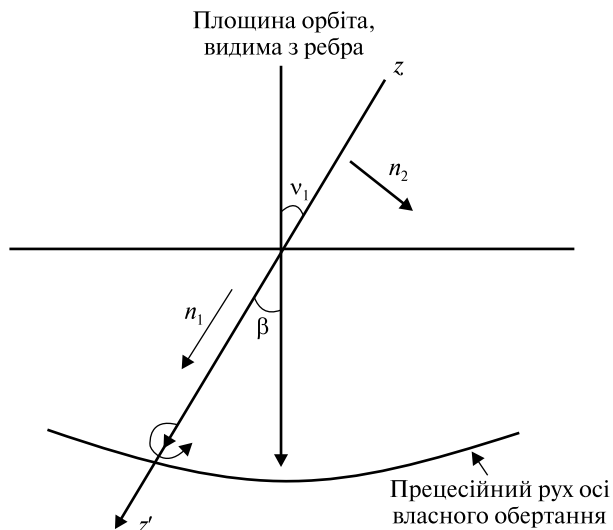


Рис. 8. Схематичне відображення на прикладі напрямків нормалей n_1 та n_2 попарного хрестоподібного розташування на поверхні ШСЗ «Січ-2» дзеркальних ПСБ відносно осі його обертання zz' і її прецесії навколо напрямку «супутник — центр Землі».



Рис. 9. Проекція сліду осі власного обертання ШСЗ «Січ-2» на небесну сферу

ший погляд хаотичне обертання [8]. Як видно із результатів, приведених у табл. 1, характер обертання КА «Січ-2» протягом 10 років відносно стабільний. Розкид значень прецесійного кута β можна пояснити невеликим (до кількох градусів) відхиленням осі власного обертання від осі zz' , яка жорстко пов'язана з напрямками нормалей n_1 і n_2 .

Виходячи з отриманих результатів, на рис. 9 представлено проекцію на небесну сферу руху кінця його осі обертання.

ВИСНОВКИ

Дослідження динамічних характеристик дестабілізованого КА «Січ-2» показали, що в комплексі з позиційними даними фотометрія ШСЗ залишається на даний час ефективним методом оцінки його орієнтації на орбіті в цілому та у випадку окремих поверхневих конструкцій, особливо коли спостереження КО провадяться з кількох пунктів і в колірних системах.

Перша спроба визначення орієнтації КА «Січ-2» була зроблена невдовзі після його виходу з ладу в 2013 р. в роботі [14], де було визначено, що вісь обертання КА нахилена до площини орбіти під кутом $\nu \sim 30^\circ$.

У процесі спостережень даного КА було зафіксовано дзеркальні спалахи різноманітної потужності від різних фрагментів поверхні супутника. Це дало нам змогу ототожнити ці фрагменти і їхнє розміщення відносно один одного і в цілому на корпусі КА. Наступне моделювання поведінки ШСЗ на орбіті показало, що приведені в табл. 2 результати спостережуваної динаміки його обертання відповідають таким умовам:

а) вісь власного обертання КА «Січ-2» збігається з його вертикальною віссю zz' , яка на час його перебування в робочому стані була вертикальною і збігалася з напрямком «центр ШСЗ — центр Землі». Після дестабілізації вона (вісь zz') прецесує навколо цього напрямку;

б) пара протилежних ПСБ розміщені перпендикулярно до вертикальної осі zz' , тобто напрямком нормалі до них (\mathbf{n}_1) збігається з напрямком вертикальної осі КА zz' . Інша пара протилежних ПСБ розвернута навколо поперечної осі КА практично на 90° по відношенню до першої пари, і напрямком нормалі до них (\mathbf{n}_2) утворює кут до напрямку вертикальної осі zz' порядку 90° (див рис. 8 та рис. 1, б).

Інші варіанти розміщення ПСБ відносно корпусу КА не дають такого однозначного збігу з результатами спостережень.

У роботі авторами було розраховано величину орбітального періоду супутника $P_{\text{орб}} = 99.5$ хв та встановлено середнє значення періоду прецесії $P_{\text{пр}} = 90.5$ с. Проаналізовано період власного обертання КА «Січ-2». Можна констатувати, що за дев'ять років після дестабілізації період власного обертання зменшувався до середини 2019 р., а потім почав знову збільшуватися. Період прецесії поводився навпаки:

$$P_o = 11.95...3.63...5.06 \text{ с,}$$

$$P_{\text{пр}} = 71.0...234.0...226.0 \text{ с.}$$

Кут прецесії осі обертання відносно напрямку з центра супутника до центра Землі становить $\nu = 38^\circ...28^\circ$. Така поведінка об'єкта відповідає класичній поведінці відомої дзиги. Кут ν в даному випадку відображає нахил осі обертання КА відносно напрямку сили тяжіння, що діє на ШСЗ, тобто напрямку «центр ШСЗ — центр Землі», що лежить у площині орбіти КА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григоревский В. М. Определение ориентации ИСЗ в пространстве по фотометрическим данным. *Бюл. ст. оптич. наблюд. искусств. спутников Земли*. 1959. № 10. С. 1—9.
2. 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.
3. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению. *Астрометрия и астрофизика*. 1983. Вып. 50. С. 89—93.
4. Кудак В. І., Періг В. М., Найбауер І. Ф. Дослідження зміни періоду власного обертання супутника «Ajisai» на інтервалі 1986—2017 рр. *Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. Фізика*. 2017. № 41. С. 140—145
5. Магнус К. Гироксеп: Теория и применения. Пер. с нем. М.: Мир, 1974. 526 с.
6. Epishev V. P., Kudak V. I., Motrunich I. I., Perig V. M., Neubauer I. F., Prysiaznyi V. I. Determination of the orientation of the artificial earth satellite in the case of diffusive scattering of light by its surface. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 1. P. 61—69.

7. Epishev V. P., Kudak V. I., Perig V. M., Motrunich I. I., Naybauer I. F., Novak, E. J., But O. Y. Influence of the Gravitational Fields of the Moon and the Sun on Long-Period Variations in the Proper Rotation of “Midas” Satellites. *Astrophys. Bull.* 2018. **73**. P. 363—372.
8. Epishev V. P., Isak I. I., Kudak V. I., Motrunich I. I., Noibauer I. F., Koshkin N. I., ..., Zhukovetskij A. V. Some results of studies of the behaviour of a satellite in orbit in contingency mode under the near-Earth space influence. *Space Science and Technology*. 2012. **18**, No. 1. P. 60—67.
9. Giese R. H. Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report*. 1963. № 127. P. 1—47.
10. 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 in Space Res.* 2016. **58**, № 3. P. 358—371.
11. Koshkin N., Shakun L., Korobeynikova E., Melikyants S., Strakhova S., Dragomiretsky V., ..., Terpan S. Monitoring of space debris rotation based on photometry. *Odessa Astron. Publs.* 2018. **31**. P. 179—185.
12. Kudak V. I., Epishev V. P., Perig V. M., Neubauer I. F. Determining orientation and spin period of Topex/Poseidon satellite by photometry metod. *Astrophys. Bull.* 2017. **72**, № 3. P. 340—348.
13. Lomb, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. and Space Sci.* 1976. 39. P. 447—462.
14. Lopachenko V. V., Rihalskiy V. V., Kozhuhov A. M., Bogdanovskiy A. N., Shulga A. N., Koshkin N. I., ..., Ryschenko V. S. The analysis of the «Sich-2» conditions by photometric observations. *Bull. Ukr. Earth Orientation Parameters Laboratory*. 2013. **8**. P. 79—86.
15. Murtazov A. K. Physical simulation of space objects’ spectral characteristics for solving the reverse problem of their photometry. *Amer. J. Modern Phys.* 2013. **2**, № 6. P. 282.
16. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II—Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys. J.* 1982. **263**. P. 835—853.

REFERENCES

1. Grigorevsky V. M. (1959). Determination of the satellite orientation in space using photometric data. *Bul. stations optical observation of satellites*, **10**, 1—3 [In Russian].
2. 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 optical observation of satellites*, **12**, 3—9 [In Russian].
3. Epishev V. P. (1983). Determination of the orientation of ASE in space by their mirror reflection. *Astrometry and astrophysics*, **50**, 89—93 [In Russian].
4. Kudak V. I., Perig V. M., Neubauer I. F. (2017). Studying of the own rotation period changes of satellite “Ajsai” on the interval 1986—2017. *Uzhhorod University Scientific Herald. Ser. Phys.*, **41**, 140—145 [In Ukrainian].
5. Magnus K. (1974). *Gyroscope, Theory and Application*. M.: Mir, 526 [In Russian].
6. Epishev V. P., Kudak V. I., Motrunich I. I., Perig V. M., Neubauer I. F., Prysiashnyi V. I. (2022). Determination of the orientation of the artificial earth satellite in the case of diffusive scattering of light by its surface. *Space Science and Technology*, **28**, № 1, 61—69.
7. Epishev V. P., Kudak V. I., Perig V. M., Motrunich I. I., Naybauer I. F., Novak, E. J., But O. Y. (2018). Influence of the Gravitational Fields of the Moon and the Sun on Long-Period Variations in the Proper Rotation of “Midas” Satellites. *Astrophys. Bull.*, **73**, 363—372.
8. Epishev V. P., Isak I. I., Kudak V. I., Motrunich I. I., Noibauer I. F., Koshkin N. I., ..., Zhukovetskij A. V. (2012). Some results of studies of the behaviour of a satellite in orbit in contingency mode under the near-Earth space influence. *Space Science and Technology*, **18**, № 1, 60—67 [In Russian].
9. Giese R. H. (1963). Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report*, № 127, 1—47.
10. 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 in Space Res.*, **58**, № 3, 358—371.
11. Koshkin N., Shakun L., Korobeynikova E., Melikyants S., Strakhova S., Dragomiretsky V., ..., Terpan S. (2018). Monitoring of space debris rotation based on photometry. *Odessa Astron. Publs*, **31**, 179—185.
12. Kudak V., Epishev V., Perig V., Noibauer I. (2017). Determining orientation and spin period of Topex/Poseidon satellite by photometry metod. *Astrophys. Bull.*, **72**, № 3, 340—348.
13. Lomb N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. and Space Sci.*, 39, 447—462.
14. Lopachenko V. V., Rihalskiy V. V., Kozhuhov A. M., Bogdanovskiy A. N., Shulga A. N., Koshkin N. I., ..., Ryschenko V. S. (2013). The analysis of the «Sich-2» conditions by photometric observations. *Bull. Ukr. Earth Orientation Parameters Lab.*, **8**, 79—86.

15. Murtazov A. K. (2013). Physical simulation of space objects' spectral characteristics for solving the reverse problem of their photometry. *Amer. J. Modern Phys.*, **2**, № 6, 282.
16. Scargle J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys. J.*, **263**, 835—853.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2023

Після доопрацювання 08.02.2023

Прийнято до друку 10.02.2023

Received 20.01.2023

Revised 08.02.2023

Accepted 10.02.2023

V. P. Epishev¹, Senior Researcher, Assoc. Prof. at the Dept. of Optics, Ph.D.

V. I. Kudak¹, Researcher

E-mail: viktor.kudak@uzhnu.edu.ua

I. I. Motrunich¹, Senior Researcher, Ph.D.

E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

V. M. Perig¹, Researcher

E-mail: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

I. F. Neubauer¹, Engineer

E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

P. P. Guranich¹, Assoc. Prof., Head of the Dept. of Optics, Ph.D.,

E-mail: pavlo.guranich@uzhnu.edu.ua

A. I. Susla¹, Lecturer at the Dept. of Optics

E-mail: anatoliy.susla@uzhnu.edu.ua

M. I. Koshkin², Senior researcher, Ph.D.

E-mail: nikkoshkin@yahoo.com

¹Uzhhorod National University, Space Research Laboratory

2a, Daleka Str., Uzhhorod, 88000 Ukraine

²Research Institute "Astronomical Observatory" of Odesa I. I. Mechnikov National University

1B, Marazlii Str., Odesa, 65014 Ukraine

ANALYSIS OF PHOTOMETRY OF THE SICH-2 SATELLITE ON A MULTI-YEAR OBSERVATION INTERVALS

On August 17, 2011, a Dnipro vehicle launched the Sich-2 satellite into Earth's orbit from the Yasny launch base. Ukrainian optical observation stations immediately began recording the satellite's photometric light curves. In mid-2012, it was established that the Sich-2 spacecraft had a certain period of self-rotation and may have failed. This was confirmed later by official sources. Based on long-term observations of the Sich-2 artificial satellite of the Earth from Uzhgorod and Odesa, its behavior in orbit from the moment of launch until 2022 was investigated. The paper reveals the possibilities of the photometric method in combination with positional data from the research on the dynamics of the rotation of space vehicles with three degrees of freedom and complex design features of surfaces. In the article, the authors determined that the axis of self-rotation of the Sich-2 spacecraft coincides with its vertical axis, which precesses around the direction "the center of the satellite — the center of the Earth". It was found that a pair of opposite PSBs are placed perpendicular to each other. The calculated value of the orbital period of the satellite was $P_{orb} = 99.5$ min. and the average value of the precession period $P_{pr} \sim 90.5$ sec. The change in the period of self-rotation of the Sich-2 spacecraft was analyzed, which has changed at an interval of 9 years after destabilization in the range of $P_o = 11.95...3.63...5.06$ sec. It was also established that the precession period during the same time varied within $P_{pr} = 71.0...234.0...226.0$ sec. The angle of the precession of the axis of rotation relative to the direction from the center of the satellite to the center of the Earth is within $38^\circ...28^\circ$.

Keywords: artificial satellite of the Earth, orientation, technique, photometry, solar panels, precession of the axis of rotation.