

**УДК** 520.82, 520.88  
**PACS** 95.85.Kr, 96.25.De, 96.25.Vt  
**DOI** 10.24144/2415-8038.2019.46.137-144

В.П. Єпішев<sup>1</sup>, В.І. Кудак<sup>1</sup>, В.І. Присяжний<sup>2</sup>, Д.М. Кожухов<sup>2</sup>, В.М. Періг<sup>1</sup>,  
 І.Ф. Найбауер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лабораторія космчних досліджень, Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Далека, 2А, Україна, e-mail: lab-space@uzhnu.edu.ua  
<sup>2</sup> Національний центр управління та випробувань космічних засобів, 01010, Київ, вул.Московська 8, Україна, e-mail: pcvkz@spacecenter.gov.ua

## Причини змін у власному обертанні штучних космічних об'єктів

Фотометрія в комплексі з позиційними спостереженнями на даний час є основним методом контролю функціонування штучних космічних об'єктів на орбіті, з якими відсутній радіозв'язок. В даній роботі представлений аналіз тривалих фотометричних спостережень низькоорбітальних штучних супутників Землі різного класу призначення. Розглянуто методологічний підхід до визначення динамічних характеристик поведінки космічних об'єктів на орбіті з використання фотометричної інформації у вигляді кривих блиску. Він базується на дослідженнях характерних особливостей у власному обертанні об'єкта і їх причин. 40-річний досвід таких досліджень дав можливість за змінами блиску об'єкта оцінити практично всі можливі фактори впливу на його функціональну динаміку. В роботі представлено шість причин виникнення власного обертання у супутника на навколосемній орбіті. Вони охоплюють як природні чинники, так і наслідки втручання людини. Якщо відомі розміри і маса дестабілізованого космічного об'єкта, його можна використати в якості індикатора протікання фізичних процесів в земній атмосфері на висоті орбітального перебування. Описані варіанти знаходження періоду власного обертання об'єкта в ручному і автоматичному режимах.

**Ключові слова:** період, супутник, обертання, фотометрія, крива блиску.

### Вступ

Вивчення поведінки космічного апарату на орбіті (КА), з якими відсутній зв'язок, за зміною його блиску на даний час по точності і можливостям залишається практично безальтернативним методом. Методологія встановлення динамічних характеристик космічних об'єктів (КО) включає в себе розробки астрофізичних досліджень обертання астероїдів і періодичних змін блиску активних зір. Однак вона має і свої особливості. Вони викликані досить швидким та нерівномірним видимим рухом цього класу КО на орбіті, їх досить складною та різноманітною формою, цілим рядом причин, які впливають на зміни власного обертання супутників. Звідси кожен запис зміни блиску космічних апаратів (КА) є неповторним. Часто період власного обертання такого об'єкта більший,

ніж час спостереження, що ускладнює його визначення. З іншого боку спостерігаються КО, період власного обертання яких становить  $1 \div 2$  секунди, а звідси фіксація зміни його блиску має бути не гіршою  $0,01 \div 0,1$  секунди. Отже, фотометричний метод контролю поведінки КА на орбіті є складною задачею і не завжди її вдається розв'язати.

Обертання космічних об'єктів відносно власного центра мас і його зміна з часом є універсальним природним ефектом. Значимість природних збурюючих факторів для конкретних ШСЗ різна. Це залежить від його конструкції, маси, висоти польоту над Землею, густини і температурного стану земної атмосфери та процесів на Сонці в моменти їх спостережень. До висоти 1000 км домінуючим, після гравітаційного, фактором, що діє на власне обертання ШСЗ, є земна атмосфера. В околі 1000 км величина збурень з бо-

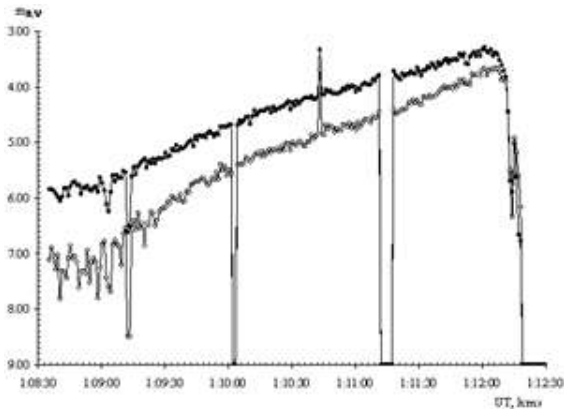


Рис. 1: Крива блиску КА "Барс-М" у В, V фільтрах (зліва), та загальний вигляд КА "Барс-М" (зправа)

ку атмосфери практично одного порядку, як з боку магнітного та електростатичного полів Землі, що надзвичайно ускладнює аналіз динамічних змін в поведінці ШСЗ. На висотах понад 1500 км починає проявлятися прямий вплив на обертання КА сонячної радіації, що має змінний характер і зростає з висотою перебування ШСЗ на орбіті. Дотичний вплив на обертання КА цієї радіації в першу чергу проявляється через зміни температури земної поверхні, густини іонізаційних поясів на висоті перебування супутників, напруженості магнітного поля Землі.

Зміни в динаміці руху ШСЗ по команді з Центра управління польотами аналізувати найважче. Їх не можна спрогнозувати і передбачити. Їх легко переплутати з впливом яких-небудь природних факторів. В даному випадку потрібно мати інформацію про орієнтацію КА, а по можливості, і про форму поверхні, а також знання основ теорії і пра-

Супутник має трьохвісну стабілізацію. Залишкова плавна зміна блиску на кривих обумовлена лише фазовою залежністю, тобто зміною положення об'єкта на орбіті відносно Сонця і спостерігача. В разі присутності в електрофотометрі окремого фонового каналу ототожнення зір і випусків відбувається автоматично. В іншому випадку бажано, щоб оператор фіксував моменти випуску об'єкта з діафрагми і попадання туди зір. Подальший крок-пошук періодичності у змінах блиску на кривій зводиться до оцінки її періоду.

Виявивши періодичні зміни на кривій,

тики обертання вільного гіроскопа.

### Прояв змін в обертанні космічних об'єктів і їх реєстрація

Якщо зміна блиску ШСЗ викликана його власним обертанням, вона має проявитися на так званій кривій періодичністю. Але перш, ніж розпочати її аналіз в інструментальній шкалі та шкалі зоряних величин, потрібно ототожнити випуски оператором об'єкта з діафрагми та попадання в діафрагму зірок по трасі цього супутника. Вони обов'язково виключаються з подальшої обробки кривої блиску. На рис.1., де приводиться крива блиску російського КА "Космос-2503" у В, V фільтрах, видно три випуски об'єкта з діафрагми (різке зменшення блиску) і одне попадання в діафрагму зорі (секундний підйом блиску).

визначення періоду обертання КА можна проводити як візуально, так і на основі спеціальних методів та програм. В обох випадках проводяться заміри часових інтервалів між ідентичними ділянками на кривій блиску. На рис.2. приведено криву блиску російського ШСЗ "Космос-2487", де між гострими з великою амплітудою змінами блиску спостерігаються менші зі зрізаними вершинами. Вони повторюються через 3-и гостро пікові бліки (2-а з великою амплітудою і 1 з малою). Їх схожість і чітка періодичність дозволяє зробити висновок, що часовий інтервал між ними і буде синодичним (видимим) періодом

власного обертання даного ШСЗ з  $P_0 \approx 11,8$  сек.

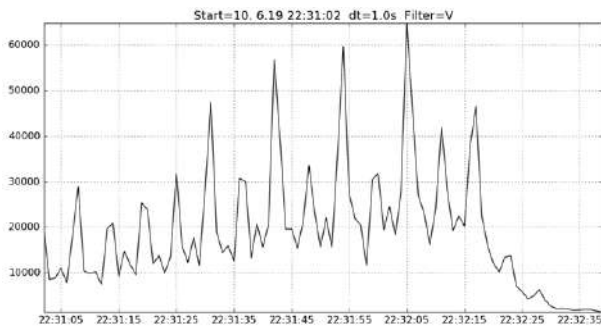


Рис. 2: Крива блиску ШСЗ "Космос-2487", отримана 10.06.2019р. у фільтрі V.

Інший приклад приведено на рис.3., де відображена крива зміни блиску американського КА "Мідас-7", який багато років перебуває на орбіті в дестабілізованому стані [1].

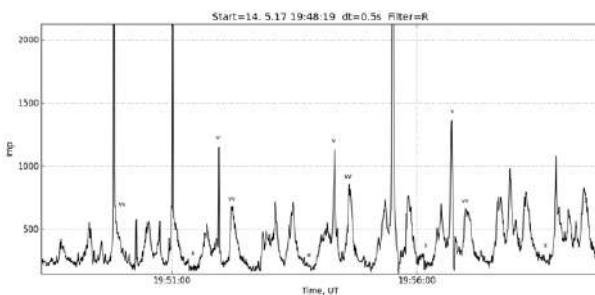


Рис. 3: Крива блиску ШСЗ "Мідас-7", за 15.05.2017р. в R фільтрі.

Подібні ділянки блиску в максимумах і мінімумах на кривій відображені одинарними і подвійними позначками. Часовий інтервал між ними і буде синодичним періодом власного обертання даного КА з  $P_0 \approx 144,0$  сек. Синодичний період власного обертання ШСЗ зумовлений зміною ракурсу освітлення супутника Сонцем і відбиванням його проміння на спостерігача в процесі руху об'єкта на орбіті на інтервалі спостережень. Цей ефект приводить до деякого фазового зміщення максимумів блиску, а звідси розкиду значень часових інтервалів між однаковими ділянками поверхні КА, які визначають видимий період обертання супутника. Середня крива блиску в цьому випадку, отримана з видимої кривої, буде характеризуватися великим роз-

кидом точок. На тривалих інтервалах спостережень такий часовий фазовий зсув приводить до того, що наступна крива блиску буде в деякій мірі відрізнитися по формі від попередньої. Тобто, внаслідок цього фазового зсуву з кривими блиску відбувається трансформація. Її врахування на кожному інтервалі спостережень проводиться наступним чином. За основу береться тривалість синодичного періоду обертання  $P_0$ , встановленого з кривої блиску, а за результатами позиційних спостережень визначається довжина видимої траси супутника  $\Delta\varphi$  в градусній мірі за час  $P_0$ . І за формулою (1) визначається поправка  $\Delta P$ , яка видимий період обертання  $P_0$  приводить до сидеричного (дійсного) періоду власного обертання. Знак ( $\pm$ ) визначається за зміною фазового кута під час спостережень. Якщо він зростає, тоді другий член рівняння буде з (+), якщо зменшується з (-).

$$\Delta P = P_0/2 \pm (\Delta\varphi/360)P_0 \quad (1)$$

Оцінка параметрів обертання ШСЗ в автоматичному режимі проводиться з використанням відповідних програм, розроблених на основі існуючих методів пошуку і оцінки періодичності при обертанні різних по формі тіл. Із багатьох методів пошуку періоду обертання КА, одним з найбільш потужних, довгий час являвся метод Лафлера-Кінмана і його модифікації [3]. "Лафлер-Кінман-класичний" – це метод, в якому для кожного пробного значення періоду розраховується параметр розсіювання точок фазової кривої блиску, що представляє собою знормоване середньоквадратичне відхилення кожної наступної по фазі точки кривої блиску від попередньої. В Лабораторії космічних досліджень УжНУ для визначення власного періоду обертання використовується власне програмне забезпечення, що ґрунтується на методі Ломба-Скаргла [4]. Цей метод вже давно використовується в астрономії і зарекомендував себе, як швидкий і надійний. Основне рівняння методу можна записати у вигляді:

$$P_x(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{n=1}^N y(t_n) \cdot \cos(\omega(t_n - \tau)) \right]^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2(\omega(t_n - \tau))} + \frac{\left[ \sum_{n=1}^N y(t_n) \cdot \sin(\omega(t_n - \tau)) \right]^2}{\sum_{n=1}^N \sin^2(\omega(t_n - \tau))} \right\} \quad (2)$$

де  $\tau$  визначено як:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N \sin(2\omega t_n)}{\sum_{n=1}^N \cos(2\omega t_n)} \quad (3)$$

де  $y$  - множина наших даних, а  $t$  - час.

Кожний із методів дає на виході частотний набір найбільш імовірних значень періодів зміни блиску з вагами співпадінь точок масиву всіх даних. Який з цих періодів є дійсний або кратний до дійсного, визначається після візуального аналізу змін блиску на кривій і врахування, по можливості, інформації про поверхневу структуру досліджуваного об'єкта. Кожен із сучасних КА має складну форму. Окремі конструкції на його поверхні можуть бути розміщені симетрично або хаотично. Їх кількість може бути різною. Це стосується і панелей сонячних батарей (ПСБ), радіоантен, оптичних засобів, кількох граней поверхні і тому подібне.

Вибір дійсного значення періоду власного або прецесійного обертання ШСЗ в даному випадку один із самих відповідальних моментів. Потрібний великий досвід та всебічні знання оператора про будову сучасних супутників, їх можливу орієнтацію, причини зміни їх обертання.

В дестабілізованому стані у космічного об'єкта обов'язково буде спостерігатися прецесія осі власного його обертання навколо напрямку на центральну силу, що викликає цю прецесію. В більшості випадків цей напрямок співпадає з напрямком "центр супутника-центр Землі", який можна розрахувати за результатами позиційних спостережень КА. Величина періоду прецесії теж оцінюється з кривих зміни блиску. Він проявляється у вигляді синусоїдальної зміни величини максимальних амплітуд наростання блиску, викликаного власним обертанням ШСЗ. Основна проблема тут полягає в тому, що прецесійні періоди в більшості випадків більші по тривалості, ніж час їх спостережень з одного пункту. Потрібно запи-

сати кілька кривих блиску, як можна ближчих по часу, "зшити" і проаналізувати на періодичність, що не завжди вдається. Коли період власного обертання короткотривалий (порядку кількох секунд) прецесійний період може проявитися на інтервалі одного спостереження КА, тривалістю кількох хвилин. Наприклад, у випадку спостереження японського супутника "Аджісай", у якого період власного обертання за 30 років змінився в межах  $1,5 \div 2,6$  секунд [2].

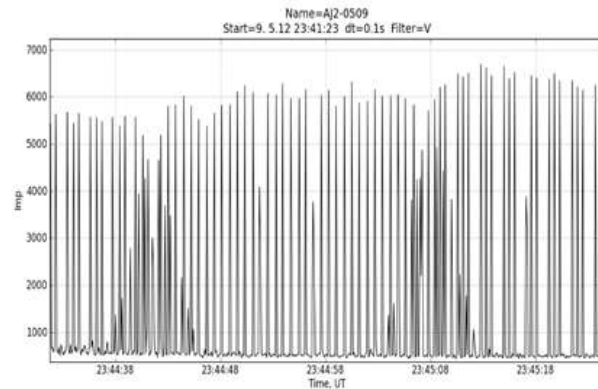


Рис. 4: Фрагмент кривої блиску супутника "Ajisai" за 09.05.2019 р. в V фільтрі.

На рис.4. приведено фрагмент кривої блиску цього КА, де на початку і в кінці кривої чітко видно період власного обертання супутника, як часовий інтервал між групами з трьох дзеркальних бліків. А темні ділянки на кривій породжені прецесією осі обертання. Часовий інтервал між ними і є в даному випадку періодом прецесії

## Визначення динамічних характеристик ШСЗ. Результати

Фотометрія в поєднанні з результатами позиційних спостережень поки що являється безальтернативним методом контролю поведінки КА на орбіті та оцінки його характерних особливостей і причин.

1. Підтвердити, що КА стабілізований по 3-х осях, достатньо в значення його блиску ввести поправки за зміну топоцентричної віддалі до нього, товщину повітряної маси на шляху “супутник-спостерігач”, фазову залежність, викликану положенням об’єкта на орбіті відносно Сонця і спостерігача. Значення блиску вздовж всієї кривої має вирівнятися в межах точності її побудови. Якщо на супутнику є обертаючі фрагменти (антени, додаткові об’єктиви, ПСБ) вони обов’язково себе проявлять на окремих проходженнях в зоні спостерігача окремим або періодичним збільшенням чи зменшенням блиску.

2. У випадку встановлення одновісної стабілізації КА, яка задається швидким власним його обертанням, необхідно провести кілька спостережень і як можна точніше визначити його власний сидеричний період. Якщо він від проходження до проходження залишається сталим, можна стверджувати, що КА застабілізований обертанням. Такі випадки зустрічаються у геостаціонарних супутників (ГСС), де антени винесені на окрему нерухому платформу, а корпус КА, обкладений сонячними батареями, швидко обертається навколо однієї із його головних осей.

3. Якщо КА зазнав швидко тривалих спрямованих зовнішніх дій, це приведе до тимчасових різних по часу та амплітуді змін блиску на кривій, які поступово від проходження до проходження супутника будуть згладжуватися і зникнуть. По можливості причини такої поведінки ШСЗ можна підтвердити за змінами в орієнтації його головних осей, як і переорієнтацію по команді з центра управління польотами.

4. Виведення КА із стабілізованого стану на час ремонтних та регламентних робіт, які трапляються з супутниками особливо стратегічного призначення, зміна блиску на кривій виглядає на початку близькою до хаотичного з поступовим збільшенням періоду власного обертання та появою прецесійного руху, а потім швидким поверненням КА в стабілізований стан.

5. Вихід з ладу КА після відключення його стабілізуючих систем спочатку супроводжу-

ється швидким його розкручуванням внаслідок прояву моменту інерції, а потім поступовим збільшенням періоду власного обертання і появи прецесійного руху осі обертання. Звідси поступове збільшення періоду власного обертання на довготривалих сеансах фотометричних спостережень і зміна орієнтації КА остаточно підтверджують де-стабілізацію ШСЗ. З часом супутник переходить в так званий стан “кувиркання” (одночасне обертання навколо 3-х осей), в якому знаходиться до кінця свого перебування на орбіті. Якщо відомі розміри і маса КА, можна розрахувати його момент інерції, а з кривих блиску визначити кутову швидкість власного і прецесійного обертання [1]. Їх добуток дає величину гіроскопічного моменту  $K$  супутника, що виникає внаслідок впливу на обертання об’єкта різних збурюючих природних факторів.

$$K = I\omega_0 \sin \beta \quad (4)$$

де  $I$  - момент інерції ШСЗ,  $\omega_0$  – кутова швидкість його власного обертання,  $\omega$  – кутова швидкість прецесії,  $\beta$  – кут прецесії. Характер його зміни на визначеному інтервалі говорить про величину діючого на КА збурюючого моменту, як  $M = dK/dt$ .

## Висновок

Як показали наші дослідження протягом 40 років, визначення сидеричного періоду обертання КА протягом кількох проходжень дає можливість встановити також і причини тієї чи іншої його поведінки на орбіті, а саме:

1. Значення періоду власного обертання протягом тривалого часу не змінюється. КА застабілізований і має 3-х вісну стабілізацію.
2. Супутник на орбіті то “завмирає”, то прокручується. З об’єтом проводяться операції за командами з центра управління.
3. На окремих кривих блиску після їх обробки проявляються не великі по амплітуді періодичні зміни блиску. Причём вони не однакові в різних фільтрах. На об’єкті є рухомі конструкції.

4. Періодичні зміни блиску на кривій досить помітні і під час деяких проходжень в полі зору частково з'являються, або зникають панелі сонячних батарей. Супутник здійснює коливні рухи переважно навколо осі, що по напрямку співпадає з вектором руху КА.
5. Збільшення або зменшення блиску на тривалих відрізках часу, у яких відсутня періодичність. Найбільш імовірно, що об'єкт перебуває в законсервованому стані.
6. Величина періоду власного обертання КА від проходження до проходження має односторонню зміну в бік збільшення або зменшення і проявляється прецесійний рух осі обертання. КА дестабілізований. Якщо разом з динамічними характеристиками ще відомі розміри, маса об'єкта, то з'являється можливість визначити спочатку гіроскопічний момент КО, а за його змінами основні збурюючі фактори, що формують його поведінку. На цьому етапі дестабілізований КА може бути індикатором протікання фізичних процесів на висоті його перебування на орбіті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Epishev V.P. Influence of the Gravitational Fields of the Moon and the Sun on Long-Period Variations in the Proper Rotation of "Midas" Satellites. Epishev V. P., Kudak V. I., Perig V. M., Motrunich I. I., Naybauer I. F., Novak E. J., But O. Yu. //Astrophysical Bulletin. — 2018. — V. 73(3). — P. 363–372
- [2] Kudak V.I. Studying of the own rotation period changes of satellite "Ajisai" on the interval 1986-2017 Kudak V.I., Perig V.M., Neubauer I.F. //Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. — 2017, — Issue 41, — P. 140–145.
- [3] Lafler J. An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer. Lafler, J., Kinman, T. D // The Astrophysical Journal Supplement Series, — 1965, — V.11, — P. 216–222.
- [4] Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. /Scargle, J. D. //The Astrophysical Journal. — 1982. — V. 263, — P. 835–853.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2019

В.П. Епишев<sup>1</sup>, В.И. Кудак<sup>1</sup>, В.И. Прысяжный<sup>2</sup>, Д.М. Кожухов<sup>2</sup>, В.М. Периг<sup>1</sup>,  
И.Ф. Найбауер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория космических исследований, Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Далекая, 2А, Украина, e-mail: lab-space@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup> Национальный центр управления и испытаний космических средств, 01010, Киев, ул.Московская 8, Украина, e-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

## Причины изменения в собственном вращении искусственных космических объектов

Фотометрия в комплексе с позиционными наблюдениями на данное время является основным методом контроля функционирования искусственных космических объектов на орбите, с которыми отсутствует радиосвязь. В

данной работе представлен анализ длительных фотометрических наблюдений низкоорбитальных искусственных спутников Земли различного класса назначения. Рассмотрен методологический подход к определению динамических характеристик поведения космических объектов на орбите с использованием фотометрической информации в виде кривых блеска. Он базируется на исследованиях характерных особенностей в собственном вращении объекта и их причин. 40-летний опыт таких исследований позволил на основании изменений блеска объекта оценить практически все возможные факторы влияния на его функциональную динамику. В работе представлены шесть причин возникновения собственного вращения у спутника на околоземной орбите. Они охватывают как природные факторы, так и последствия вмешательства человека. Если известны размеры и масса дестабилизированного космического объекта, его можно использовать в качестве индикатора протекания физических процессов в земной атмосфере на высоте орбитального пребывания. Описанные варианты нахождения периода собственного вращения объекта в ручном и автоматическом режимах.

**Ключевые слова:** период, спутник, вращение, фотометрия, кривая блеска.

V.P. Epishev<sup>1</sup>, V.I. Kudak<sup>1</sup>, V.I. Prysiaznyi<sup>2</sup>, D.M. Kozhukhov<sup>2</sup>, V.M. Perih<sup>1</sup>,  
I.F. Neubauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of space reserches, Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Daleka Str., 2A, Ukraine, e-mail: lab-space@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>National space facilities control and test center, 01010, Kyiv, Moskovska Str., 8, Ukraine, e-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

## Reasons for change in artificial space objects own rotation

**Purpose.** Photometry in conjunction with positional observations is currently the main method of controlling the operation of artificial space objects in orbit with which radio communication is lost. This paper presents an analysis of long-range photometric observations of low-orbital artificial Earth satellites of various functionality class.

**Methods.** A methodological approach to determining the dynamic characteristics of the behavior of space objects in orbit using photometric information in the form of light curves is considered. It is based on studies of the characteristics of the object's own rotation and their causes.

**Results.** 40 years of experience in such studies has made it possible to evaluate virtually all possible factors affecting its functional dynamics by changes in the light of an object. The paper presents six reasons for the occurrence of a satellite's own rotation in the Earth's orbit. They cover both natural factors and the effects of human intervention.

**Conclusions.** If the size and mass of the destabilized satellites are known, then this satellite can be used as an indicator of the course of physical processes in the Earth's atmosphere at the height of the satellite's orbit. The variants of finding the period of own rotation of the object in manual and automatic modes are described.

**Keywords:** period, satellite, rotation, photometry, light curve.

## REFERENCES

- [1] Epishev V. P., Kudak V. I., Perig V. M., Motrunich I. I., Naybauer I. F., Novak E. J., But O. Yu. (2018), "Influence of the Gravitational Fields of the Moon and the Sun on Long-Period Variations in the Proper Rotation of "Midas" Satellites", //Astrophysical Bulletin. — V. 73(3). — P. 363 – 372
- [2] Kudak V.I., Perig V.M., Neubauer I.F. (2017), "Studying of the own rotation period changes of satellite "Ajisai" on the interval 1986-2017", //Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. Issue 41, pp. 140 – 145.

- [3] Lafler, J., Kinman, T. D. (1965), "An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer", // The Astrophysical Journal Supplement Series, V. 11, pp. 216–222.
- [4] Scargle J. D. (1982), "Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data", The Astrophysical Journal, V. 263, pp. 835–853.

©Ужгородський національний університет