

УДК 520.82, 520.88
PACS 95.85.Kr, 96.25.De, 96.25.Vt
DOI 10.24144/2415-8038.2019.45.141-148

А.М. Кожухов¹, С.В. Рьщенко¹, Т.А. Дементьев¹, В.П. Епишев²,
И.И. Мотрунич², И.Ф. Найбауэр², В.М. Периг², В.И. Кудак², Д.М. Кожухов³,
О.Н. Пискун³

¹Центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля, с. Залесцы, Дунаевецкий р-н, Хмельницкая обл., Украина, 32444, e-mail: a.m.kozhukhov@gmail.com

²Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина, e-mail: lkduzhgorod@gmail.com

³Национальный центр управления и испытаний космических средств, Киев, Украина

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА CUBESAT ПО ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ (НА ПРИМЕРЕ КА ARKYD 6A)

Фотометрия низкоорбитальных искусственных спутников, сверхмалого размера представляет собой сложную задачу, которая требует комплексного подхода в ее решении. Целью было определить параметры собственного вращения искусственного спутника ARKYD 6A, исходя из фотометрической и астрометрической информации полученной на квантово-оптической станции (КОС) «Сажень-С» Центра приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля Национального центра управления и испытаний космических средств. Авторами использованы фотометрические и астрометрические методы исследований объекта, а также другие методы моделирования и собственные методы определения ориентации космического аппарата. Приведены результаты фотометрических наблюдений космического аппарата (КА) ARKYD 6A, которые были проведены в мае 2018 года. Несмотря на сложные условия наблюдений были получены три кривые блеска КА. Анализ кривых показал, что КА потерял стабилизацию и вращается. Определены ориентировочные параметры вращения КА. Показана возможность фотометрических наблюдений сверхмалых КА на низких высотах телескопами с малой апертурой. Анализ полученных в течении трех ночей наблюдений показал, что КА ARKYD 6A вращается вокруг линии «зенит – надир» с периодом ~ 145 с. При этом его продольная ось отклонена от данной линии на угол $32^\circ - 35^\circ$.

Ключевые слова: низкоорбитальные космические объекты, космические аппараты типа CubeSat, фотометрические наблюдения.

Введение

На сегодня существует тенденция по резкому увеличению количества запускаемых и планируемых к запуску на низкую околоземную орбиту малых космических аппаратов (КА). К 2026 году ожидается увеличение мировой орбитальной группировки до 9000 и более КА, большую часть которых будут составлять малые и сверхмалые (мини-, микро- и наноспутники) КА, в частности стандарта CubeSat с различным

форм-фактором (от 1U до 12U) и весом от 1 до 100 кг. Такие КА имеют малые размеры, но обладают высокой функциональностью, позволяющей заменить большинство своих более крупных «коллег». Кроме того, данная технология позволяет сравнительно дешево создавать многоспутниковые орбитальные группировки для обеспечения беспрецедентной оперативности получения информации. Однако, ввиду малых размеров таких КА, существует проблема контроля их состояния в случае потери с ними связи или

возникновения иных нештатных ситуаций. Особенно актуальна такая задача для экспериментальных КА – демонстраторов технологий.

В рамках данного исследования был проведен эксперимент по мониторингу состояния КА ARKYD 6A (международный номер 18004V, стандарт CubeSat 6U) при помощи сравнительно небольшого оптического инструмента, оснащенного современным светоприемным оборудованием.

Методика проведения и первичной обработки наблюдений

Используемая аппаратура. Наблюдения проводились при помощи канала широ-

кого поля модернизированной аппаратуры электронной регистрации оптических наблюдений (АЭРОН-М) квантово-оптической станции (КОС) «Сажень-С» Центра приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ и КНП) Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУИКС) Государственного космического агентства (ГКА) Украины. Канал оснащен короткофокусным светосильным телескопом АФР-М (D = 300 мм, F = 300 мм), с КМОП камерой ZWO ASI-174MM-Cool (mono) [1]. Характеристики телескопа и камеры приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Табл. 1: Характеристики телескопа АФР-М

1	Диаметр объектива, мм	300
2	Фокусное расстояние, мм	300
3	Концентрация 80% световой энергии в пикселе размером, мкм	Не более 11
4	Диаметр линейного поля зрения, мм	Не менее 52

Табл. 2: Характеристики КМОП камеры ZWO ASI-174MM-Cool (mono)

1	Светоприемный детектор	1/1.2" CMOS IMX174LLJ / IMX174LQJ
2	Размеры детектора, мм	11,3 x 7,1
3	Максимальная разрешающая способность, пикселей	1936x1216
4	Размер пикселя, мкм	5,86
5	Диапазон экспозиций, с	От 0,03 до 1000
6	Разрядность АЦП, бит	10 или 12
7	Интерфейс управления и передачи данных	USB 3.0
8	Скорость регистрации при максимальном разрешении и максимальной разрядности АЦП	Не более 128 кадров/с, в зависимости от экспозиции.

В максимальном разрешении телескоп с данной камерой обеспечивают масштаб 4"/пиксель в поле зрения 129'x81'.

Телескоп установлен на монтировке телескопа АЗТ-28 КОС «Сажень-С». Монтировка имеет максимальную скорость перемещения до 2,5°/с и способна сопровождать КА

на низких орбитах.

Проведение наблюдений. Наблюдения КА проводились в режиме сопровождения. Начальные условия для расчета целеуказаний брались в виде двустрочных элементов (Two Line Elements — TLE) из базы данных Объединенного космическо-

го командования Вооруженных сил США (<https://www.space-track.org>).

Оператор, проводящий сеанс наблюдений, обнаруживал КА в поле зрения, после чего начинал запись наблюдений. Запись проводилась в виде последовательности отдельных кадров в формате FITS (Flexible Image Transport System). Экспозиция подбиралась таким образом, чтобы КА был достаточно хорошо виден оператором.

Условия наблюдений были сложными. На небе местами проявлялась облачность. Во время нескольких прохождений часть траектории КА проходила около Луны, что также служило препятствием для качественного проведения наблюдений. Дополнительно усложняло работу дрожание монтировки в некоторых положениях, из-за высокой скорости перемещения КА. Совокупность данных факторов привела к тому, что с 11 по 22

мая 2018 года были получены качественные наблюдения всего трех прохождений (табл. 3), другие были отбракованы на этапе предварительной обработки.

Предварительная обработка наблюдений. На кадрах, признанных пригодными для дальнейшей обработки, проводилась предварительная оценка инструментального блеска КА методом апертурной фотометрии программой Tangra 3.6¹. Полученная кривая инструментального блеска ИСЗ после этого анализировалась для отбраковки сбойных и аномальных измерений. Причинами могли быть наличие дымки, уменьшавшей блеск КА, прохождение через апертуру яркой звезды, увеличение уровня фона из-за близости Луны и т.п. Количество оставшихся после данной отбраковки оценок блеска для каждого прохождения представлено в табл. 3.

Табл. 3: Результаты наблюдений КА ARKYD 6A

Дата	Общая длительность наблюдений мин:с	Экспозиция с	Общее количество кадров	Количество оценок блеска
11.05.2018	3:44.8	0.20	746	677
16.05.2018	2:49.8	0.19	755	644
22.05.2018	1:39.0	0.30	324	321

Отобранные серии кадров, оценка блеска ИСЗ, а также начальные условия для получения целеуказаний передавались для дальнейшего анализа специалистам Лаборатории космических исследований Ужгородского национального университета (ЛКИ УжНУ).

Анализ полученных данных

Для оперативной оценки поведения ИСЗ Arkyd 6A достаточным оказалось 3-х фотометрических записей, которые представлены на рис. 1. Без редукации к так называемым стандартным условиям видно, что у

КА нарушена стабилизация, и он вращается. Наиболее удачная запись блеска спутника была осуществлена 11.05.2018 года, по результатам которой удалось довольно надежно оценить период обнаруженного вращения ИСЗ, равным временному интервалу между двумя одинаковыми по форме и по амплитуде подъемами блеска (рис. 2). И хотя записи блеска в другие даты менее удачны, они практически подтвердили полученный ранее результат. Определение величины периода вращения проводился с использованием разработанного в ЛКИ УжНУ программного обеспечения основанного на известном методе Ломба-Скрагла [2]. В результате среднее его значение на интервале наблюдений было равно $P = (145.0 \pm 1.5)$ сек.

¹<http://www.hristopavlov.net/Tangra3/>

Фотометрическая запись блеска КА за 16.05.2018 года оказалась удачной в ином плане. На ней зафиксирован в 20h12m50s зеркальный всплеск блеска на момент которого в дальнейшем было вычислено направление нормали к отражающей зеркально детали поверхности объекта (рис. 3). Расчет проводился в спутникоцентрической системе экваториальных координат. Соответственно, были рассчитаны направления

«спутник – Солнце», «спутник - наблюдатель», «спутник – центр Земли», углы освещения объекта Солнцем и углы отражения света от его поверхности, а также угол между направлениями «спутник – центр Земли» и нормалью. Все расчеты выполнялись с помощью специального программного обеспечения «Orientation», разработанного в ЛКИ УжНУ [3].

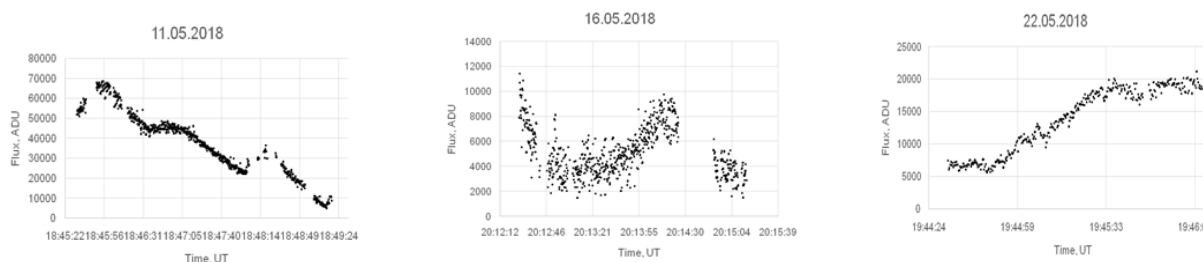


Рис. 1: Результаты предварительной обработки наблюдений КА ARKYD 6A – инструментальные кривые блеска для трех проходов.

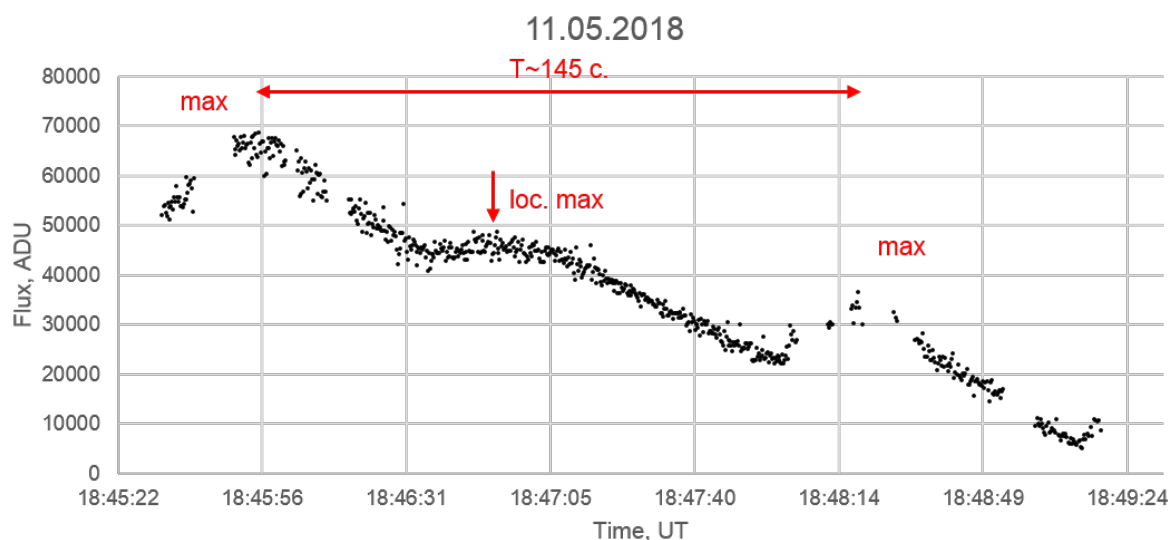


Рис. 2: Анализ кривой блеска за 11.05.2018.

Точность определения углов и направлений определяется точностью позиционных наблюдений объекта. Если есть позиционные ПЗС-наблюдения, где точность составляет несколько угловых секунд, то все направления могут быть рассчитаны с точностью $\sim 0^\circ.1$. Однако, если позиционные данные вычисляются из элементов TLE, то-

чность может снизиться почти до $1^\circ.0$. В нашем случае набор TLE был достаточно точным и погрешность вычислений была порядка $0^\circ.5$.

Кроме того, программное обеспечение позволяет вычислять на заданные моменты времени положения КА в азимутальной системе координат. Это помогает наблюдателю

определится, какую часть поверхности ИСЗ он видит в интересующийся его момент времени.

В нашем случае зеркальный всплеск произошел в минимуме блеска, то есть, когда КА был развернут в сторону наблюдателя и Солнца минимальной площадью поперечного его сечения. Исходя из предоставленного изображения строения данного ИСЗ, уве-

ренно можно сказать, что он был развернут к наблюдателю торцевой своей частью, а зеркальный блик произошел от объектива фотоаппарата, размещенного на этом участке корпуса КА. Таким образом, направление нормали в момент зеркального всплеска отображает направление продольной оси корпуса ИСЗ по отношению к наблюдателю и оси «центр спутника – центр Земли».

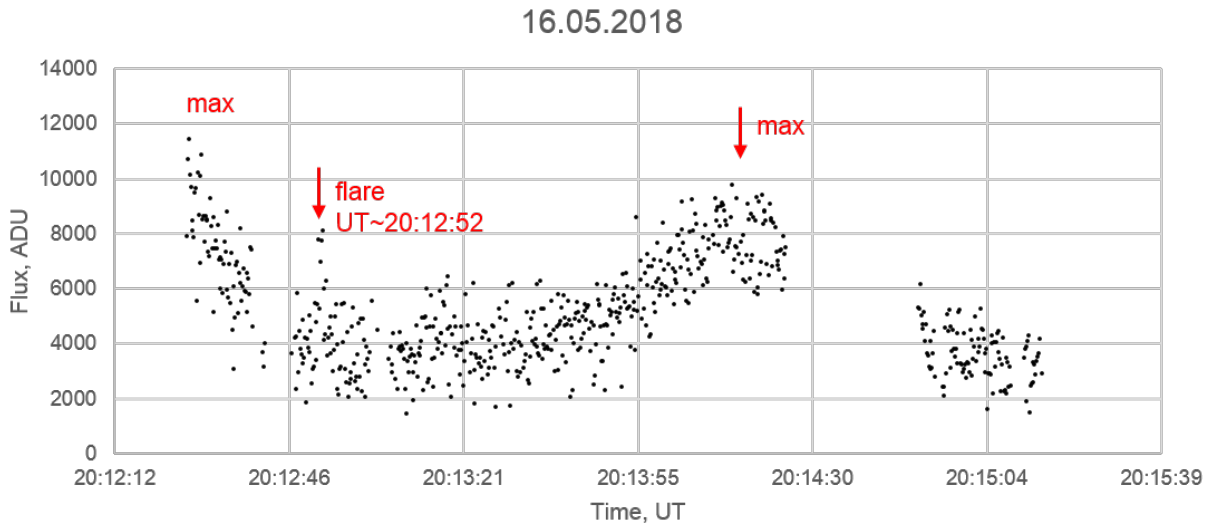


Рис. 3: Анализ кривой блеска за 16.05.2018.

Направление в пространстве нормали \vec{n} к любой отражающей поверхности зер-

кального типа рассчитывается следующим образом:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = [(x_0 + x_{obs})^2 + (y_0 + y_{obs})^2 + (z_0 + z_{obs})^2]^{-1/2} \cdot \begin{pmatrix} x_0 + x_{obs} \\ y_0 + y_{obs} \\ z_0 + z_{obs} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $x_0 = \cos \alpha_0 \cos \delta_0$; $y_0 = \sin \alpha_0 \cos \delta_0$; $z_0 = \sin \delta_0$ – соответствуют направлению из центра спутника к центру Солнца, а $x_{obs} = \cos \alpha_{obs} \cos \delta_{obs}$; $y_{obs} = \sin \alpha_{obs} \cos \delta_{obs}$; $z_{obs} = \sin \delta_{obs}$ – направлению от центра спутника к наблюдателю. α_0 и δ_0 , α_{obs} и δ_{obs} являются, соответственно, координатами Солнца и наблюдателя в экваториальной спутникоцентрической системе координат. α_{obs} и δ_{obs} вычисляются по синхронному позиционному наблюдению объекта и связаны с топоцентрическими его координатами как $\alpha_{obs} = \alpha_t \pm 180^\circ$; $\delta_{obs} = -\delta_t$.

Модельный анализ видимого вращения ИСЗ Argyd 6A в сочетании с видом записанных кривых блеска, показал, что оно осуществлялось именно вокруг оси «центр спутника – центр Земли».

Если спутник вращается вокруг своей вертикальной оси, которая лежит в плоскости его орбиты, то ее направление может быть определено, как: $\alpha_R = \alpha \pm 180^\circ$; $\delta_R = -\delta$, где α , δ – геоцентрические экваториальные координаты наблюдаемого объекта.

Результаты вычислений на момент зеркального всплеска приведены на рис 4. Здесь

угол освещения спутника Солнцем ϵ равен углу отражения света в сторону наблюдателя и его значение по величине равно $\epsilon = 44^\circ.3$. А угол между направлением нормали и осью «центр спутника - центр Земли» ра-

вен $\sim 32\text{-}35^\circ$ (точность обусловлена шириной и амплитудой зеркального блика). В нижней части рисунка схематично изображено движение в пространстве продольной оси КА Arkyd 6A.

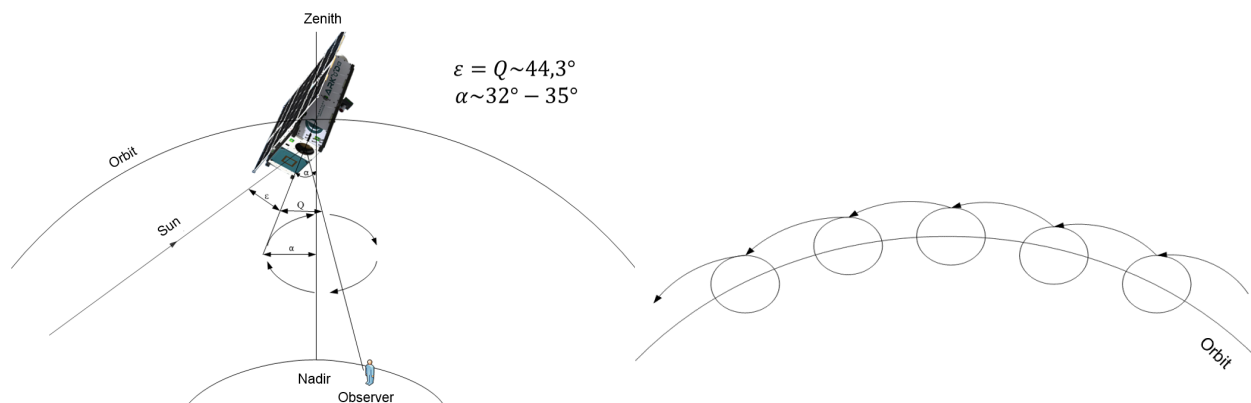


Рис. 4: Анализ вращения и след оси вращения КА ARKYD 6A на небесной сфере.

Выводы

1. КА ARKYD 6A имеет малую яркость и высокую скорость видимого движения, что усложняло проведение его наблюдений.
2. Дополнительными сложностями при проведении наблюдений были: облачность, механический дрейзг телескопа, наличие на небе Луны.
3. Анализ полученных в течение трех ночей наблюдений показал, что КА ARKYD 6A по-

терял стабилизацию и вращается вокруг линии «зенит-надир» с периодом примерно 145 с. При этом его продольная ось отклонена от данной линии на угол в $32^\circ - 35^\circ$.

4. Наблюдения в целом подтвердили возможность оценки состояния низкоорбитальных наноспутников типа CubeSat, используя телескопы с малой апертурой. Учитывая рост количества подобных КА на орбите Земли, такая оценка является востребованной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Maigurova N. Results from optical CCD observations of asteroid 2014 JO25 during its close approach to the Earth on April 19, 2017 / Maigurova N., Pomazan A., Kozhuhov O. // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. – 2017. – V. 56(2). – P. 22 – 25.
- [2] 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.
- [3] Епішев В.П. Исследование ориентации и поверхности ИНТ методом электрофотометрии: дис. кандидата физико-математических наук: 01.03.02 / Епішев Виталий Петрович. – Одесса. 1985. – 157 с.

Стаття надійшла до редакції 09.07.2019

О.М. Кожухов¹, С.В. Рищенко¹, Т.О. Дементьєв¹, В.П. Єпішев²,
І.І. Мотрунич², І.Ф. Найбауер², В.М. Періг², В.І. Кудаєв², Д.М. Кожухов³,
О.М. Піскун³

¹Центр прийому і обробки спеціальної інформації а контролю навігаційного поля, с. Залісці, Дунаєвецький р-н, Хмельницька обл., Україна, 32444, e-mail: a.m.kozhukhov@gmail.com.

²Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна, e-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ, Україна

ОЦІНКА СТАНУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ТИПУ CUBESAT ЗА ОПТИЧНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ (НА ПРИКЛАДІ КА ARKYD 6A)

Фотометрія низькоорбітальних штучних супутників, надмалого розміру являє собою складну задачу, що потребує комплексного підходу у її вирішенні. Цілю було визначити параметри власного обертання штучного супутника ARKYD 6A, виходячи з фотометричної та астрометричної інформації отриманої на квантово-оптичній станції (КОС) «Сажень-С» Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів. Авторами використані фотометричні та астрометричні методи досліджень об'єкта, а також інші методи моделювання та власні методи визначення орієнтації космічного апарата. Приведені результати фотометричних спостережень космічного апарату (КА) ARKYD 6A, які були проведені у травні 2018 р. Не дивлячись на складні умови спостережень, були отримані три криві блиску КА. Аналіз кривих показав, що КА втратив стабілізацію й обертається. Визначені орієнтовні параметри обертання КА. Показана можливість фотометричних спостережень надмалих КА на низьких висотах телескопами з малою апертурою. Аналіз отриманих напротязі трьох ночей спостережень показав, що КА ARKYD 6A обертається навколо лінії «зеніт – надир» з періодом ~ 145 с. При цьому його повздовжня вісь відхилена від даної лінії на кут $32^\circ - 35^\circ$.

Ключові слова: низькоорбітальні космічні об'єкти, космічні апарати типу CubeSat, фотометричні спостереження.

О.М. Kozhukhov¹, S.V. Rishchenko¹, T.A. Dementiev¹, V.P. Yepishev²,
I.I. Motrunich², I.F. Neubauer², V.M. Perig², V.I. Kudak², D.M. Kozhukhov³,
O.M. Piskun³

¹Center for Special Information Reception and Processing and Navigation Field Control of the National Space Facilities Control and Test Center, Zalitsi, Ukraine, e-mail: a.m.kozhukhov@gmail.com

²Laboratory of space researches, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine, e-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

³National Space Facilities Control and Test Center, Kyiv, Ukraine

STATE IDENTIFICATION OF CUBESAT-TYPE SATELLITES BY OPTICAL OBSERVATIONS (ON THE EXAMPLE OF ARKYD 6A SPACECRAFT)

Purpose. Determine the parameters of the own rotation of the artificial satellite ARKYD 6A, based on photometric and astrometric information obtained at the Sazhen-S quantum-optical station (COS) at the Center for the reception and processing of special information and control of the navigation field of the National Space Facilities Control and Test Center.

Methods. The authors used photometric and astrometric methods of research of the object, as well as other methods of modeling and their own methods for determining the orientation of the spacecraft.

Results. The results of photometric observations of the spacecraft ARKYD 6A carried out in May 2018. Despite the difficult observational conditions, three light curves of the spacecraft were obtained. Analysis of the curves showed that the spacecraft lost its stabilization and rotates. The approximate rotation parameters of the spacecraft are determined. The possibility of photometric observations of ultra-small spacecraft at low altitudes with small aperture telescopes is shown.

Conclusion. An analysis of observations obtained over three nights showed that the ARKYD 6A revolves around the «zenith-nadir» line with a period ~ 145 seconds. At the same time, its longitudinal axis is discarded from this line at an angle of $32^\circ - 35^\circ$.

Keywords: low orbit artificial space objects, CubeSat satellites, photometrical observations.

REFERENCES

- [1] Maigurova, N., Pomazan, A., Kozhuhov, O. (2017), «Results from optical CCD observations of asteroid 2014 JO25 during its close approach to the Earth on April 19, 2017», Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, V. 56(2), pp. 22–25.
- [2] 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.
- [3] Epishev, V.P. (1985), The research of orientation and surface of artificial space body by electrophotometry method: dissertation thesis [Issledovaniye oriyentatsii i poverkhnosti INT metodom elektrofotometrii: dis. kand. fiz.-mat. nauk], Odessa, 157 p.

©Ужгородський національний університет