

11. Kozak P. M. Upward-moving low-light meteor – I. Observation results / P. M. Kozak, J. Watanabe // MNRAS. – 467, 1. – 2017. – P. 793–801.

12. Интернет-ресурс "The live sky". – <https://theskylive.com>

13. Интернет-калькулятор Національної астрономічної обсерваторії Японії. – [https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/gst\\_en.cgi](https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/gst_en.cgi)

Надійшла до редколегії 4.03.2021

П. Козак, канд. физ.-мат. наук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

С. Старый, канд. физ.-мат. наук

Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарева НАН Украины, Киев, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ БОЛИДА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СО СТАЦИОНАРНОЙ МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ БЫТОВОЙ ОХРАННОЙ ВИДЕОКАМЕРОЙ

*Приведен метод определения экваториальных координат яркого болида, зарегистрированного 9 августа 2020 г. в Киеве при помощи широкоугольной слабочувствительной бытовой охранной видеокамеры. Из-за малой чувствительности камеры в кадрах с болидом не было ни одного объекта сравнения, а небосклон был закрыт кроной деревьев более чем наполовину. Для поиска объектов сравнения с известными экваториальными координатами было предложено использовать изображения Луны и Марса, которые систематически попадали в кадр в следующем месяце – сентябре. Приведены соответствующие формулы. Точность определения экваториальных координат болида составила десятые доли градуса при поле зрения камеры  $100^\circ$ , а угловая длина траектории – около  $15^\circ$ . Болид был очень медленным и, как показали расчеты, не принадлежал к метеорному потоку Персеиды, который был активен в момент наблюдения.*

*Ключевые слова: метеоры, видеонаблюдения метеоров, наблюдения с бытовой охранной камерой, методы наблюдений обработки метеоров.*

P. Kozak, PhD

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

S. Stariy, PhD

V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

## DETERMINATION OF EQUATORIAL COORDINATES OF BOLIDE FROM OBSERVATIONS WITH STATIONARY LOW-SENSITIVE HOME GUARD VIDEO CAMERA

*Method for determination of equatorial coordinates of a bright bolide detected with wide-angle low-sensitive home guard camera on 9 August 2020 above Kyiv is presented. Due to low sensitivity of the camera there were no objects for comparison in the frames with the bolide, and sky was obstructed more than a half by the crown of trees. For a search of objects of comparison with known equatorial coordinates we proposed to use the images of the Moon and Mars, which systematically got into frames during the next month – September. The corresponding formulae are presented. The precision of the bolide's equatorial coordinates calculation were tenths of degree at field of view of the camera  $100^\circ$ , and the trajectory angular length was near  $15^\circ$ . The bolide was very slow, and according to calculations did not belong to the Perseid meteor shower, which was active during the observations.*

*Keywords: meteors, video observations of meteors, observations with home guard video camera, methods for meteor observations processing.*

УДК 521.182; 523.44

А. Казанцев, канд. физ.-мат. наук,

Л. Казанцева, канд. физ.-мат. наук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПЕРЕХОДУ ТРОЯНЦІВ ПЛАНЕТ ДО КЕНТАВРІВ

*З каталогу Міжнародного центру малих планет на 2020 р. відібрано Троянці Юпітера та Нептуна. Проведено чисельні розрахунки еволюції орбіт на інтервалах до 1 млн років. Установлено, що виявлені на сьогодні всі Троянці Нептуна та нумеровані Троянці Юпітера напевно чи можуть переходити в популяцію Кентаврів у найближчі сотні тисяч років.*

*Ключові слова: Троянці, Кентаври, орбіти.*

**Вступ.** Кентаврами називають малі тіла, що рухаються між орбітами Юпітера й Нептуна. Деякі з них проявляють кометні властивості. Тому Кентаври розглядаються як вагоме джерело ядер комет сімейства Юпітера [4]. Більшість науковців розглядає пояс Койпера як джерело походження Кентаврів. Головним джерелом Кентаврів вважають розсіяний диск [2; 7; 10]. Крім того, додатковими джерелами розглядають окремі групи тіл у поясі Койпера, що містяться в резонансах із Нептуном 3:2 [8] та 2:1 [9]. Кентаври на орбітах з великими нахилами ( $i > 70^\circ$ ) чи зі зворотним рухом ( $i > 90^\circ$ ) розглядають як тіла з хмари Оорта чи з міжзоряного простору [1]. Можливими додатковими незначними джерелами Кентаврів називають Троянців Нептуна [5] і Троянців Юпітера [3]. Зазвичай більш внутрішні зони Сонячної системи, як можливі джерела Кентаврів, не називаються.

Перехід до Кентаврів Троянців Юпітера та Нептуна викликає окремий інтерес, адже ці тіла рухаються по доволі стійких орбітах. Щоправда автори публікації [5] моделювали перехід Троянців Нептуна до Кентаврів у розрахунках на мільярди років та ще у процесі міграції планет-гігантів. Гіпотеза міграції планет в останні роки є досить популярною для пояснення окремих спостережних даних у розподілі малих тіл Сонячної системи. Зокрема, прибічники гіпотези міграції пропонують пояснення розподілу Троянців планет, яким він є нині. В той же час, явних спостережних даних про реальність процесу міграції планет не існує.

Автори публікації [3] в своїх розрахунках не залучали процес міграції планет. Але їхні чисельні розрахунки еволюції орбіт проводились на інтервали в мільярди років. Такі розрахунки викликають сумніви щодо точності результатів, отриманих на таких довгих інтервалах.

У цій публікації ми розглянемо можливість переходу Троянців Юпітера та Нептуна до Кентаврів з урахуванням реальної точності чисельних розрахунків.

**Метод розрахунків і точність.** Головні результати роботи отримано на основі чисельного інтегрування еволюції орбіт тіл Сонячної системи. Тому варто описати метод інтегрування. Детальний опис цього методу наведено в [6]. На відміну від класичного варіанта, у нашому підході інтегруються лише компоненти других похідних по часу, викликані збуреннями. Повний гравітаційний вплив Сонця розраховується за формулами незбуреного руху.

Головною перевагою вказаного підходу порівняно з класичним є мінімальне значення підінтегральної функції. Це дозволяє вибирати значно більший крок інтегрування, що збільшує точність розрахунків на довгих часових інтервалах.

Оцінити точність розрахунків на довгих інтервалах часу можна таким чином. Потрібно виконати чисельні розрахунки в деякому часовому напрямку на певний інтервал часу (до  $t_k$ ). У тому ж процесі обчислення, не припиняючи розрахунків, потрібно виконати зворотний процес – обчислити орбіту до початкового моменту  $t_0$ . Різниця між початковим та обчисленим елементами орбіти на момент  $t_0$  характеризує похибку розрахунків. За зміни напрямку інтегрування похибки в розрахунках, що накопичувались до моменту  $t_k$ , продовжують зростати. У процесі повернення до моменту  $t_0$  ми отримуємо похибки на інтервалі  $2t_k$ . Такі розрахунки можна умовно назвати розрахунками "туди-назад".

У ході розрахунків еволюції орбіт малих тіл похибки накопичуються не лише в елементах орбіт малих тіл, а і в елементах орбіт збурюючих тіл, планет. Оскільки елементи орбіти планет змінюються у відносно малих межах, то саме за цими похибками можна визначати граничні інтервали розрахунків.

Таблиця 1

Значення  $da$  (а.о.) на інтервалі 2000 років із різними кроками інтегрування

Планета	Крок (добі)		
	2.0	5.0	20.0
Юпітер	$1 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-6}$
Сатурн	$1 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-6}$
Уран	$3 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-6}$
Нептун	$1 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-6}$

Нами виконано чисельні розрахунки еволюції орбіт чотирьох планет-гігантів (Юпітер – Нептун) з урахуванням їхніх взаємних збурень методом "туди-назад" на різних часових інтервалах і з різними кроками інтегрування. Визначено  $da$ -різницю між початковими та розрахованими значеннями великих півосей орбіт планет на момент  $t_0$ . Відповідні значення  $da$  на інтервалі 2000 років з різними кроками інтегрування  $sp$  наведено в табл. 1, з якої видно, що похибка у великих півосях орбіт планет зростає нелінійно зі збільшенням кроку інтегрування.

Потім виконано аналогічні розрахунки на 500 000 р. та на 1 млн років із кроком 5 діб. Відповідні значення  $da$  наведено в табл. 2. У публікаціях [3; 5] кроки інтегрування були більшими 5 діб.

Таблиця 2

Значення  $da$  (а.о.) з кроком інтегрування 5 діб за інтегрування на різних інтервалах

Планета	Інтервал розрахунків	
	500 000 р.	1000 000 р.
Юпітер	$2 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$
Сатурн	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$
Уран	$2 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$
Нептун	$8 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$

З табл. 2 бачимо, що похибка у великих півосях орбіт планет також зростає нелінійно зі збільшенням інтервалу інтегрування. Крім того, видно, що при інтегруванні на 1 млн років похибки у великих півосях орбіт планет уже стають занадто великими для точних розрахунків. Особливо це стосується Урана та Нептуна. Точність чисельних розрахунків за іншими існуючими програмами принципово не відрізняється від наших обчислень. Тому розрахунки на інтервали часу понад 1 млн років навряд чи можна вважати прийнятними.

**Відбір Троянців планет.** Троянці планети – це малі тіла, що перебувають в околі точок Лагранжа  $L_4$  чи  $L_5$  на орбіті цієї планети. Тобто, орбіти Троянців містяться в резонансі 1 : 1 з планетою. Великі півосі таких орбіт періодично перетинають значення  $ap$ , яке рівне великій півосі орбіти планети. Стійкість перебування орбіти в резонансі можна визначати певною кутовою величиною, що має назву аргументу лібрації. Для резонансу 1 : 1 цей параметр описується виразом

$$\sigma = (\pi_p + M_p) - (\pi_a + M_a),$$

де  $\pi_p$  і  $\pi_a$  – довготи перигеліїв орбіт планети й астероїда,  $M_p$  та  $M_a$  – середні аномалії цих тіл. Для резонансних орбіт аргумент лібрації здійснює періодичні коливання з певною амплітудою  $ds$  (лібрирує). Чим менша амплітуда коливань  $\sigma$ , тим більша відстань астероїда від планети, тим стійкішим є його резонанс. Для орбіт у точці  $L_4$  значення  $\sigma$  коливаються відносно  $300^\circ$ , для орбіт у точці  $L_5$  – відносно  $60^\circ$ .

З каталогу Міжнародного центру малих планет (MPC) було відібрано орбіти малих тіл із великими півосями, близькими до великих півосей Юпітера та Нептуна. Серед вказаних масивів відібрали Троянців планет. Для цього виконано чисельні розрахунки орбіт на коротких часових інтервалах: від 300 років для Юпітера до 10 000 р. для Нептуна. На таких інтервалах уже видно, чи лібрирує  $\sigma$ , тобто, чи перебуває ця орбіта в резонансі. Для прикладу на рис. 1. наведено залежності  $\sigma(t)$  для орбіт Троянців Юпітера з різних точок Лагранжа.

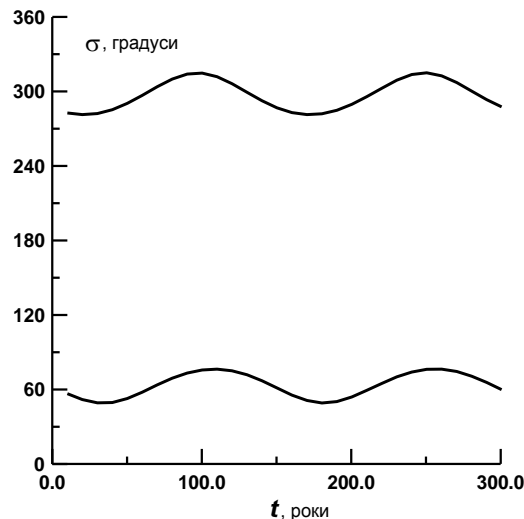


Рис. 1. Залежності  $\sigma(t)$  для орбіт Троянців Юпітера з різних точок Лагранжа:  $L_4$  – нижня,  $L_5$  – верхня.

У Юпітера виявилось понад 7000 Троянців, з них нумерованих – майже 5000. У Нептуна виявилось 28 Троянців, нумерованих – 5.

**Чисельні розрахунки еволюції орбіт Троянців.** Перехід Троянців планет у популяцію Кентаврів може відбуватися лише після виходу орбіти тіла з резонансу. Для пошуків таких переходів можна обчислювати еволюцію кожної орбіти на якомога довгих інтервалах часу. У цьому випадку такі інтервали не повинні перевищувати 1 млн років. Однак у разі великої кількості орбіт такий шлях доволі довгий. Тоді можна обрати значно простіший, але не менш ефективний шлях.

Як показали розрахунки орбіт Троянців, амплітуда коливань аргументу лібрації  $ds$  є практично незмінною на інтервалах до 1 млн років. У першу чергу це стосується відносно невеликих значень  $ds < 33^\circ$ . Такі величини змінюються в межах  $2^\circ$ – $3^\circ$  на інтервалах до 1 млн років. Критичними є значення  $ds > 40^\circ$ . Такі орбіти вже можуть покидати резонанс, що загрожує зближенню із планетою і, як наслідок, істотними змінами в елементах орбіти. Тому наша задача зводилася до визначення величин  $ds$  для орбіт усіх відібраних Троянців.

Розрахунки показали, що для орбіт нумерованих Троянців значення  $ds$  не перевищують  $32^\circ$ . Отже, цим тілам у найближчі кілька сотень тисяч років навряд чи загрожує перехід у популяцію Кентаврів.

Орбіти Троянців Нептуна були порашовані всі як для нумерованих, так і для нунумерованих. Тут виявилась одна орбіта з  $ds = 44^\circ$ . Ця орбіта через 80000 років вийшла з резонансу, перебувала поза резонансом близько 800 000 років, а потім знову повернулася в резонанс (рис. 2).

Як показали розрахунки модельних орбіт з  $ds > 40^\circ$ , вихід орбіт Троянців Нептуна з резонансу не завершувався переходом у Кентаври. Такі орбіти знову поверталися в резонанс. Причому спостерігалися переходи між точками Лагранжа  $L_4$  та  $L_5$ . Таким чином, можна зробити висновок, що і виявленим на сьогодні Троянцям Нептуна навряд чи загрожує перехід у популяцію Кентаврів у найближчі кілька сотень тисяч років.

Зрозуміло, що висновки щодо переходу до Кентаврів Троянців Юпітера та Нептуна отримано з урахуванням лише гравітаційних збурень від планет. Разом із тим, вихід орбіти з резонансу можуть спричинити якісь негравітаційні фактори, зокрема зіткнення з навколишніми малими тілами.

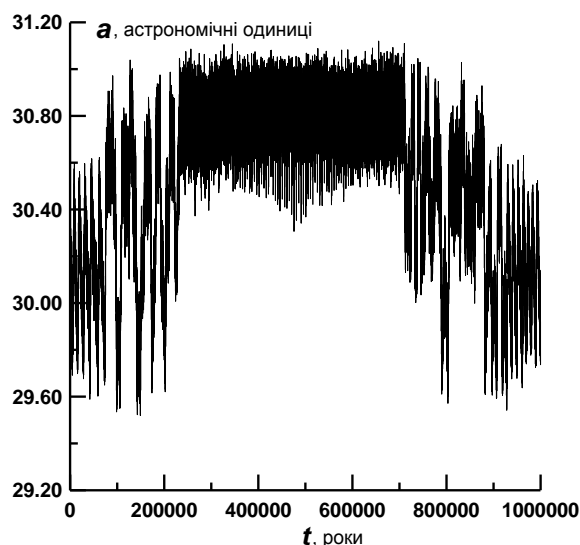


Рис. 2. Зміна з часом великої півосі орбіти Троянця Нептуна з початковим значенням  $ds = 44^\circ$