

УДК 521.86

Ф. І. Кравцов, І. В. Лук'яник

Науково-дослідна лабораторія «Астрономічна обсерваторія»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
04053 Київ-53, вул. Обсерваторна 3

Спостереження покриттів зір астероїдами методом часової розгортки їхніх зображень

Описано метод часової розгортки ПЗЗ-зображень для спостереження явища покриття зір астероїдами. Метод використовувався для спостережень дев'яти можливих покриттів на спостережній станції в с. Лісники в 2006 р. з використанням телескопа АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 2.8$ м) і ПЗЗ ST-8 ХМЕ. Тільки для покриття зорі 0587-00209-1U астероїдом 76 Freia 4 листопада 2006 р. були отримані відстані між центрами астероїда і зорі та час різних фаз покриття. У наближенні сферично-симетричної форми астероїда 76 Freia визначено його розмір. Для інших — тільки мінімальні відстані між центрами астероїдів та зір. Запропонований метод дає можливість реєструвати явище покриття зір астероїдами з високим часовим розділенням.

НАБЛЮДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ЗВЕЗД АСТЕРОИДАМИ МЕТОДОМ ВРЕМЕННОЙ РАЗВЕРТКИ ИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, Кравцов Ф. И., Лукьяник И. В. — *Описан метод временной развертки ПЗС-изображений для наблюдений явления покрытий звезд астероидами. Метод применялся для наблюдений девяти возможных покрытий на наблюдательной станции в с. Лесники в 2006 г. с использованием телескопа АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 2.8$ м) и ПЗС ST-8 ХМЕ. Только для покрытия звезды ГYC 0587-00209-1U астероидом 76 Freia 4 ноября 2006 г. были получены расстояния между центрами астероида и звезды и времена различных фаз покрытия. В приближении сферически-симметрической формы астероида 76 Freia определен его размер. Для других — только минимальные расстояния между центрами астероидов и звезд. Предлагаемый метод позволяет регистрировать явления покрытия звезд астероидами с высоким временным разрешением.*

OBSERVATIONS OF ASTEROID OCCULTATIONS BY THE METHOD OF TEMPORAL UNSQUEEZING THEIR IMAGES, by Kravtsov F. I., Lukyanyk I. V. — *We describe the method of temporal unsqueezing CCD-images for observations of asteroid occultations. The method was applied for observations of nine asteroid occultations with the telescope AZT-8 ($D =$*

= 0.7 m, $F = 2.8$ m) and CCD ST-8 XME at the Lisnyky observational station in 2006. The distance between the centres of the asteroid and star and time of asteroid occultation were determined only for the occultation of the star TYC 0587-00209-1U by asteroid 76 Freia have obtained on 4 November 2006. Besides, in the assumption of spherically symmetric shape of asteroid 76 Freia, its size was determined. For other asteroids we found the minimal distances between their centres and stars. The method allows one to observe asteroid occultations with high time resolution.

ВСТУП

Покриття зір астероїдами — це досить рідкісні й цінні астрономічні явища. До теперішнього часу зареєстровано всього близько 400 подібних подій. Успішні спостереження таких покриттів дають можливість визначати розміри та альbedo астероїдів. Крім того, спостереження з високим часовим розділенням дають принципову можливість визначати кутові розміри зір, що покриваються. Причому на відміну від місячних покриттів тут не потрібне розділення у тисячні частки секунди. Оскільки швидкості астероїдів відносно зір значно менші за швидкість Місяця, то і часове розділення може складати соті частки секунди.

Звичайно, головною метою астероїдних покриттів вважається визначення розмірів астероїдів. При цьому для досягнення необхідної точності також потрібне часове розділення у соті частки секунди. У наш час для цього найпростіше використовувати ПЗЗ-камери, що працюють у телевізійному режимі, тобто реєструють 20—24 кадрів за секунду. Зрозуміло, що при цьому не використовується одна з головних переваг ПЗЗ-камер — накопичення сигналу. Тому покриття слабких зір недоступні для реєстрації в такому режимі.

Якщо використовувати накопичення сигналу, то можна реєструвати набагато слабкіші об'єкти. Однак при цьому низьке часове розділення виключає реєстрацію самого явища покриття. Нижче ми описуємо методику спостережень астероїдних покриттів з використанням часової розгортки їхніх зображень. Такий режим дає можливість разом з накопиченням сигналу досягти задовільного часового розділення.

МЕТОДИКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Суть методу часової розгортки полягає в наступному. Під час спостереження швидкоплинного явища телескоп потрібно переміщувати з постійною кутовою швидкістю відносно зір. При цьому зображення всіх об'єктів у полі зору будуть розтягуватися по приймальних елементах матриці у вигляді смуг (слідів), довжина яких визначається швидкістю переміщення об'єкта по матриці та часом експозиції. Ширина кожного сліду визначається блиском об'єкта і кутовою швидкістю переміщення телескопа. Безпосередньо перед покриттям зоря й астероїд зливаються настільки, що будуть відображатися єдиним слідом, ширина якого визначається їхнім сумарним блиском. Якщо явище покриття відбудеться, то ширина такого сліду зменшиться до розміру, обумовленого блиском астероїда. При досить слабких астероїдах на сліді може утворюватися розрив. Довжина розриву визначається тривалістю покриття. Виконавши точний фотометричний розріз уздовж сліду, можна з достатньою точністю визначити довжину хорди

астероїда уздовж лінії покриття. При цьому лінійне розділення уздовж сліду буде одночасно й розділенням явища покриття в часі.

Переміщення телескопа відносно зір можна здійснити двома способами: 1) скористатись їхнім добовим рухом при вимкненому годинниковому механізмі телескопа або 2) при увімкненому годинниковому механізмі скористатись корекційним рухом по одній з осей телескопа. Кожен із цих способів має свої переваги й недоліки. Перевага першого способу полягає в тому, що швидкість зсуву зображень об'єктів під час експозиції постійна й точно визначена. Недоліком є те, що дану швидкість не можна змінювати, а вона в деяких випадках виявляється досить великою — до 15' за хвилину. При невеликому розмірі ПЗЗ-матриці максимальний час для експозиції становитиме не більше однієї хвилини. За цей час зоря й астероїд просто зникнуть із поля зору. Тому початок і тривалість експозиції потрібно вибирати дуже старанно, щоб покриття, якщо воно відбудеться, повністю відобразилося на сліді. Однак якщо помилка ефемериди за часом становить хвилину або більше, то ймовірність того, що явище покриття буде зафіксовано, є невеликою. У такому випадку необхідно зменшувати швидкість зміщення зображень.

Перевага другого способу, коли замість зупинки телескопа використовується корекційний рух по одній з його осей, полягає у можливості мати меншу швидкість зсуву об'єктів у полі зору. Його недолік — нерівномірність руху телескопа, обумовлена суто технічними причинами. Внаслідок цього на слідах зір будуть утворюватися звуження й потовщення, що призведе до утруднень при обробці. Крім того, при зменшенні швидкості зсуву зображень по матриці зменшується також і часове розділення явища покриття. Тому швидкість корекційного руху варто вибирати оптимальною, щоб врахувати похибки ефемерид та забезпечити водночас високе часове розділення. При спостереженнях покриттів астероїдів у 2006 р. використовувались обидва методи. Додатково спостереження поля зір з астероїдом до покриття та після нього дає змогу визначати точний момент середини покриття та відстані між центрами зорі і астероїда.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Спостереження покриттів зір астероїдами проводилися у первинному фокусі телескопа АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 280$ см), розташованого на спостережній станції НДЛ «Астрономічна обсерваторія» кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського університету імені Тараса Шевченка в селі Лісники ($\lambda = 30.5247^\circ$, $\varphi = 50.2979^\circ$). Зображення небесних об'єктів реєструвалися за допомогою ПЗЗ-камери ST-8 ХМЕ. Камера була передана ЮНЕСКО Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка в 2005 р. як благодійна допомога. Робоче поле камери становить 1530×1020 пікселів, лінійні розміри — 13.8×9.2 мм, що при спостереженні у первинному фокусі відповідає кутовим розмірам $16.7 \times 13.4'$. Для прив'язки до часу використовувався GPS-приймач.

Моменти та інші параметри можливих покриттів вираховувалися за допомогою програми Д. Гаральда OCCULT Asteroidal Occultations v.3.6.0.

У 2006 р. були проведені спостереження дев'яти можливих покриттів. У табл. 1 наведені деякі обставини покриттів: t_0 — ефемеридний момент середини покриття, Δt — його тривалість, d_a — видимий діаметр астероїда,

Таблиця 1. Обставини можливих астероїдних покрить

№	Дата, 2006 р.	Астероїд	Зірка	t_0 , UT	Δt , с	d_a	l , км
1	20 березня	4 Vesta	2 UCAC 40836920	$20^h 47.2^m$	43.6	0.304"	190
2	18 травня	368 Heidea	2 UCAC 24872095	23 40.7	7.5	0.055	640
3	24 липня	7 Iris	TYC 1210-01269-1U	23 08.6	8.6	0.162	810
4	06 серпня	612 Veronika	2 UCAC 35442825	19 38.8	5.2	0.034	150
5	06 серпня	2291 Kevo	TYC 0473-05371-1U	21 22.2	2.3	0.020	200
6	29 серпня	1390 Abastumani	TYC 2393-01361-1U	02 41.2	4.4	0.040	70
7	14 вересня	1369 Ostanina	TYC 5173-02077-1U	21 42.5	5.2	0.033	590
8	12 жовтня	3902 Yoritomo	TYC 1712-01041-1U	18 28.0	2.6	0.017	100
9	04 листопада	76 Freia	TYC 0587-00209-1U	16 27.3	30.3	0.101	310

l — найменша відстань від центра смуги покриття до пункту спостережень.

Знімки робилися з короткими експозиціями при увімкненому годинниковому механізмі, тобто в режимі накопичення. В залежності від яскравості астероїда та зорі, що покривається, тривалість експозиції вибиралася у межах від 0.1 до 20 с. За таких умов отримувалось кілька десятків зображень потрібного зоряного поля як до, так і після моменту покриття.

Поблизу моменту покриття спостереження проводилися таким чином, щоб ПЗЗ-камера реєструвала картину часової розгортки явища покриття зорі астероїдом. Якщо зоря, яка покривається, мала блиск, достатній для точної фотометрії, то розгортка зображення робилась завдяки зупинці годинникового механізму телескопа на час до 90 с. В іншому випадку на часовий рух телескопа накладався корекційний рух по часовому куту зі швидкістю $2''/с$, або корекційний рух по схиленню з тією ж швидкістю на 1—8 хв. Початок такої процедури вибирався таким чином, щоб момент можливого покриття припадав на середину спостережного часового інтервалу. Спостереження астероїда 368 Heidea були припинені через погіршення погодних умов, а покриття астероїда 1390 Abastumani відбувалося у ранкових сутінках і не було зафіксоване.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Первинні редуції проводились з використанням пакету ESO MIDAS. В подальшій обробці використовувався власний програмний комплекс. Оскільки на всіх зоряних полях є зображення астероїда та зорі, що ним покривається, то вимірювання різниці координат Δx , Δy астероїда відносно зорі (між середньозваженими центрами зображень) робилися в пікселях. Точність вимірювань Δx та Δy в залежності від якості зображення складала 0.02—0.3 пікселя.

На рис. 1 наведені траєкторії руху астероїдів відносно зірок, що покриваються. Рис. 1 дає можливість методами аналітичної геометрії вирахувати найменшу видиму відстань ρ_{\min} , на яку зблизилися зоря та астероїд (табл. 2). Для цього по зоряних полях був обчислений масштаб зображень $0.655 \pm 0.002''/пкл$, який практично не змінювався від ночі до ночі.

У табл. 2 t_{\min} — момент часу, коли астероїд перебував на мінімальній видимій відстані від зорі, $\Delta \alpha$ та $\Delta \delta$ — екваторіальні координати точки

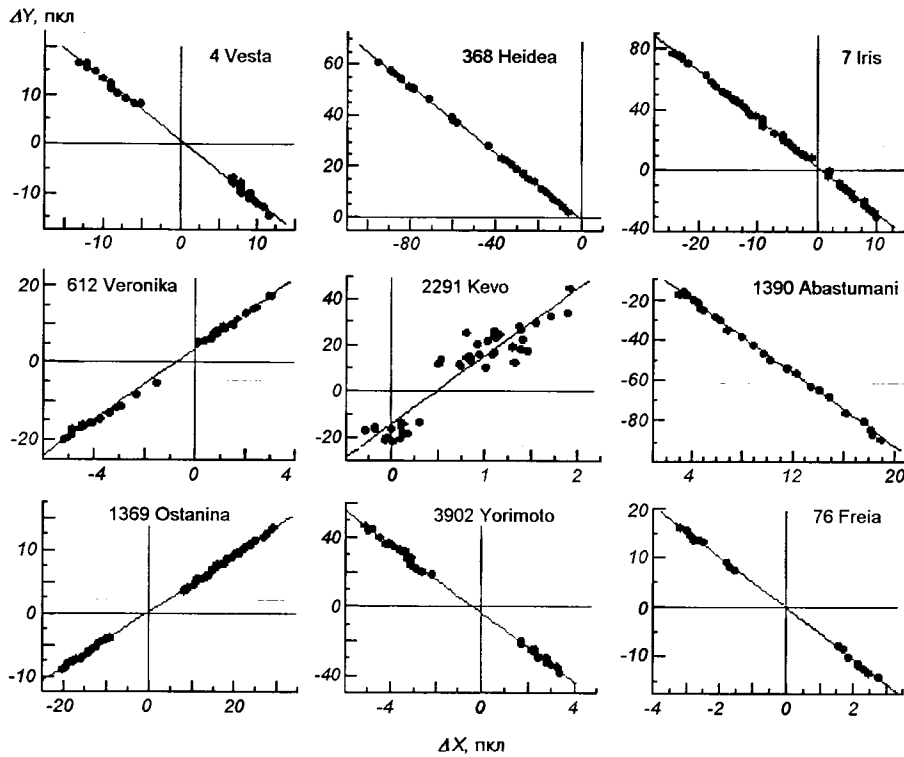


Рис. 1. Траєкторії руху астероїдів відносно зір, що покриваються

Таблиця 2. Значення ρ

№	ρ_{\min}	t_{\min} , UT	$\Delta\alpha$	$\Delta\delta$
1.	$0.25 \pm 0.04''$	$20^h 46^m 01.0^s \pm 1.2^s$	-0.0031 ± 0.0005^s	$-0.24 \pm 0.04''$
2.	0.41 ± 0.09	$23 40 43 \pm 12$	-0.0005 ± 0.0011	-0.41 ± 0.09
3.	0.52 ± 0.04	$23 08 49.3 \pm 0.2$	0.014 ± 0.001	0.48 ± 0.04
4.	0.43 ± 0.02	$19 39 05.6 \pm 0.9$	0.025 ± 0.001	-0.21 ± 0.01
5.	0.33 ± 0.02	$21 21 26.3 \pm 1.4$	-0.017 ± 0.002	-0.21 ± 0.01
6.	0.35 ± 0.06	$02 41 09.9 \pm 1.8$	0.010 ± 0.002	-0.32 ± 0.05
7.	0.001 ± 0.008	$21 42 21.24 \pm 0.04$	0.0001 ± 0.0005	0.0004 ± 0.003
8.	0.28 ± 0.02	$18 27 35.0 \pm 0.2$	0.013 ± 0.001	-0.20 ± 0.02
9.	0.02 ± 0.01	$16 27 56.9 \pm 0.2$	0.001 ± 0.001	-0.02 ± 0.01

мінімальної видимої відстані астероїда відносно зорі. Для обчислення t_{\min} були побудовані графіки руху астероїдів відносно зір, що покривались (рис. 2).

Якщо астероїд спостерігався після можливого явища покриття, ρ_{\min} та t_{\min} відповідають точці перетину графіків руху астероїда до моменту покриття та після нього. Для тих астероїдів, для яких відсутні подібні спостереження, методом найменших квадратів вираховувалася видима швидкість руху астероїда відносно зорі, а потім за відомим значенням ρ_{\min} обчислювався час t_{\min} .

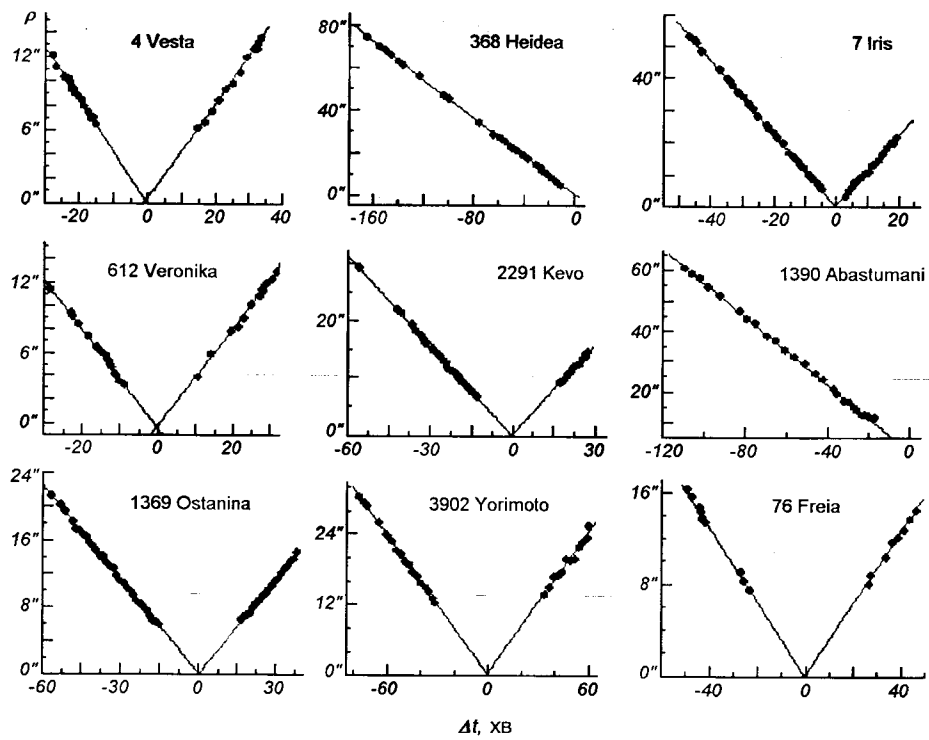


Рис. 2. Графіки руху астероїдів відносно зір

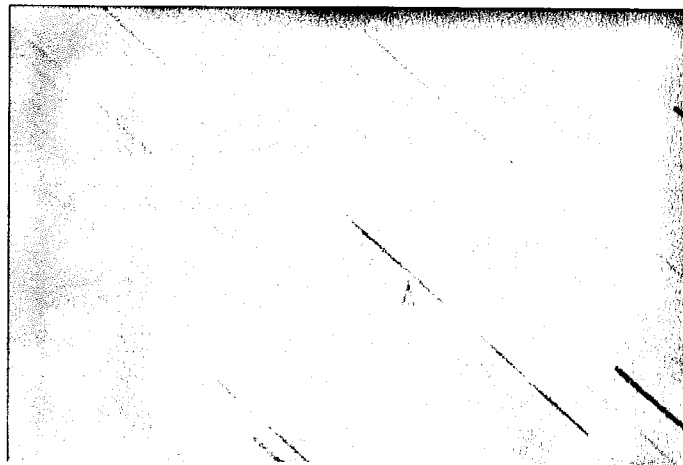
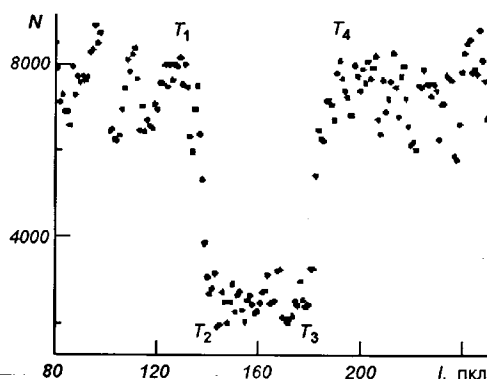


Рис. 3. Покриття зорі TYC 0587-00209-1U астероїдом 76 Freia 4 листопада 2006 р.

Порівнюючи значення d_a з табл. 1 та ρ_{\min} з табл. 2, можна побачити, що 14 вересня та 4 листопада повинно було спостерігатися покриття зір відповідними астероїдами. Дійсно, 4 листопада на сліди комплексу зоря-астероїд (рис. 3) чітко фіксується явище покриття, в той час як на сліді 14 вересня, незважаючи на детальну фотометрію, явище покриття не було виявлене. Очевидно, час початку експозиції було підібрано невдало через неточність визначення ефемерид явища. Іншим можливим поясненням може бути погіршення погодних умов під час протікання явища (на кадри розгортки видно розриви на слідах всіх зір, викликані хмарністю).

Рис. 4. Фотометричний розріз вздовж сліду комплексу «астероїд + зоря»



Як вже зазначалось, недоліком використання корекційного руху телескопа є його нерівномірність, обумовлена суто технічними причинами. Щоб позбавитись впливу нерівномірності руху телескопа, отриманий фотометричний розріз вздовж комплексу тіл «астероїд + зоря» ділився на аналогічний фотометричний розріз вздовж сліду сусідньої зорі. На рис. 4 наведено фотометричний розріз вздовж сліду комплексу «зоря + астероїд» для явища покриття зірки TYC 0587-00209-1U астероїдом 76 Freia 4 листопада 2006 р.

Щоб отримати тривалість окремих фаз покриття, необхідно знати швидкість руху зображення у ПЗЗ-камері. Із цією метою вимірювалися прямокутні координати початку сліду та координати середини явища покриття на сліді у пікселях, тобто довжину сліду від початку експозиції й до середини покриття. Маючи моменти початку експозиції та середини покриття, отримуємо середню швидкість руху зір по чипу, а відтак — відповідні моменти обставин покриття. Для покриття зорі TYC 0587-00209-1U астероїдом 76 Freia 4 листопада 2006 р. отримуємо:

$$T_1 = 16^h 27^m 47.2^s,$$

$$T_2 = 16^h 27^m 48.5^s,$$

$$T_3 = 16^h 28^m 04.8^s,$$

$$T_4 = 16^h 28^m 05.7^s,$$

$$T_3 - T_1 = T_4 - T_2 = 17.4 \pm 0.3^s,$$

$$T_2 - T_1 = T_4 - T_3 = 1.14^s.$$

Таким чином, з огляду на швидкість руху астероїда у просторі верхня межа діаметра зорі склала $d_* = 0.006 \pm 0.002''$, а хорда (відстань, проєкована на поверхню астероїда, уздовж якого відбулося покриття) — $L_a = 0.909 \pm 0.003''$.

Використовуючи відоме значення геоцентричної відстані астероїда на момент покриття та отримане значення мінімальної відстані між видимими центрами зорі та астероїда, у наближенні сферично-симетричної форми астероїда обчислюємо його діаметр $d_a = 187$ км (ефемеридне значення 184 км). Точність визначення діаметра астероїда повністю визначається точністю визначення ρ_{\min} . Потрібно відзначити, що діаметр зорі може бути завищений у кілька разів, тому що світлочутливі елементи ПЗЗ-матриці

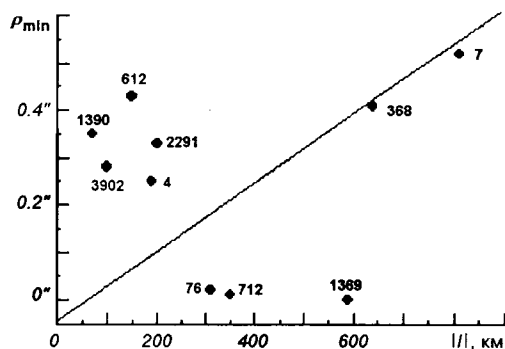


Рис. 5. Залежність найменшої видимої відстані ρ_{\min} між центрами зорі та астероїда від відстані пункту спостережень до центра полоси покриття.

мають скінченні розміри, а швидкість сканування недостатня, щоб одержати прийнятне часове розділення.

На рис. 5 представлено графік залежності найменшої видимої відстані між центрами зорі та астероїда від відстані пункту спостережень до центра смуги покриття. Тут додано ще одну точку, яка відповідає вдало проведеному спостереженню покриття зорі ТУС 183-01958-1 астероїдом 712 Boliviana 11 жовтня 2005 р. Замість очікуваної прямо пропорційної залежності графік показує дещо складнішу залежність. Впадає в око, що астероїди з меншими номерами (4, 7, 76, 368) менше відхиляються від очікуваної залежності. На наш погляд, це можна пояснити тим, що астероїди з меншими номерами мають точніше визначені орбіти. Хоча не варто виключати наявність похибок каталогу, який використовується програмою Д. Гаральда OCCULT Asteroidal Occultations v.3.6.0, й похибки при розрахунку ефемерид вказаною програмою (внутрішні похибки програми).

ВИСНОВКИ

Використання методу часової розгортки зображень при спостереженні явищ покриттів зір астероїдами дає змогу визначити розміри астероїдів (у наближенні припущення сферично-симетричної форми) протягом кількох годин з одного пункту спостереження, що є недоступним при використанні телевізійних систем спостереження покриттів слабкими астероїдами. Запропонований метод був випробуваний на спостереженні дев'яти можливих покриттів зір астероїдами і довів свою дієвість. Внаслідок скінченності розмірів світлочутливих елементів ПЗЗ-камери запропонованим методом можна отримувати тільки верхню межу діаметра зорі, яка покривається. Метод дає також можливість визначення екваторіальних координат астероїда та уточнювати елементи його орбіти.

Надійшла до редакції 01.11.07