

бка платівок ведеться в чотирьох астрономічних закладах: 1. Астрономічному інституті Академії наук Республіки Узбекистан, 2. Народній обсерваторії м. Ессен, Німеччина, 3. НДІ "Миколаївська астрономічна обсерваторія, 4. ГАО НАНУ. Для обробки платівок використовується програмне забезпечення, створене в ГАО НАНУ. За результатами обробки астронегативів у ділянці від 21 години до 3 годин та від -2° до -6° зроблено оцінку внутрішніх похибок отриманого каталога. Середні похибки складають для всіх зір $-0.2''$ та 0.18 зор.вел. (для зір яскравіших $B < 14$ зор.вел. $-0.1''$ та 0.1 зор.вел) для екваторіальних координат та B -величин відповідно.

Q. Yuldoshev, Msc., O. Usmanov, Msc, Sh. Ehgamberdiev, Dr.Sc.
Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences,
M. Muminov, Ph.D.
Andijan State University, Andijan, Uzbekistan,
H. Relke, Ph.D.
Walter Hohmann Observatory, Essen, Germany,
Yu. Protsyuk, Ph.D.
Research Institute "Nikolaev Astronomical Observatory", Ukraine,
V. Andruk, Msc.
Main Astronomical Observatory NASU, Ukraine

ASTROMETRY AND PHOTOMETRY OF THE DIGITIZED PHOTOGRAPHIC PLATES OF THE KITAB PHOTOGRAPHIC SKY SURVEY

Photographic observations for the FON project were carried out in the Kitab Observatory (KO UzAS) from 1981 to 1996 on the DAZ telescope ($F/D = 300/40$). During this period 2600 photographic plates was exposed. In the 2015 all astronegatives were transferred to the Astronomical Institute in Tashkent (Uzbekistan) and digitization of these plates was started. The 1250 plates have already been processed and the equatorial coordinates α , δ and B -magnitudes of found objects were received. The coordinates of stars were obtained in the Tycho2 system and the B -magnitudes in the system of the photoelectric standards. The processing of the digitized images is carried out in four astronomical institutes: UBAI UzAS, Tashkent (Uzbekistan), WHO, Essen (Germany), RI NAO, Mykolaiv (Ukraine), MAO NASU, Kyiv (Ukraine). For the data reduction is used the software created in the MAO NASU. Based on the results of the processing of the astronegatives in the area with α from 21 hours to 3 hours and δ from -2° to -6° were estimated the internal errors of the received catalogue. The mean errors calculated for all stars are 0.2 arcsec and 0.18 mag. For the stars brighter than $B < 14$ magnitude the errors are 0.1 arcsec and 0.1 mag for the equatorial coordinates and B -magnitudes respectively.

УДК 521.3, УДК 52-17, УДК 523.6

Н. Коваленко, канд. фіз.-мат. наук
Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕГРАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА ЕВОЛЮЦІЮ ОРБІТ КЕНТАВРІВ

В роботі розглянуто орбітальну еволюцію деяких активних Кентаврів на одну тисячу років з врахуванням та без врахування негравітаційних прискорень. Отримано оцінку впливу врахування негравітаційних ефектів на еволюцію орбіт Кентаврів. Показано, що зсув у даті проходження перигелію для розглянутих об'єктів популяції Кентаврів сягає від 1 сек до 79 сек за один оберт та від 1 сек до 0,72 діб за весь період інтегрування (близько тисячі років).

Вступ. Уявлення про орбітальні відмінності комет та астероїдів суттєво змінилися в останні десятиліття. Адже і серед астероїдів головного поясу виявилися об'єкти що проявляють кометну активність (на сьогодні 11 кандидатів у комети головного поясу), і серед більш віддалених Кентаврів, що рухаються по ексцентричних орбітах, також значна частка об'єктів мають зафіксовану кометну активність (26 кандидатів в активні Кентаври серед 121 на сьогодні відомих, див. табл. 1). Тож є цікавим оцінити вплив негравітаційних ефектів на орбітальну еволюцію малих тіл з популяцій, які раніше вважалися суто "астероїдними".

Негравітаційні ефекти у русі комет. Активні комети проявляють у своєму русі негравітаційні ефекти. Так прийнято називати характерні особливості руху, викликані випаровуванням речовини з поверхні кометного ядра. Під дією таких явищ ядро комети знає реактивного тиску, що, у свою чергу, викликає прискорення ядра. Таке негравітаційне прискорення може як зменшувати, так і збільшувати швидкість руху комети навколо Сонця. Його величина залежить від комбінації таких факторів як напрямок власного обертання ядра, рельєф поверхні ядра, розподіл областей активної сублімації та ін. Тому визначення значень негравітаційних прискорень є непростюю і важливою задачею. Крім того, вектор результуючого негравітаційного прискорення не обов'язково проходить крізь центр ядра, що викликає зміну швидкості обертання ядра, вимушену прецесію, а значить, змінює величини негравітаційних прискорень.

Оскільки реактивні сили, пов'язані з кометною активністю, помітно діють лише поблизу перигелію, а далі комета рухається практично лише під дією гравітаційних сил, у минулому застосовувати досить прості методи врахування негравітаційних прискорень. Так, Маковер припустив, що середній рух комети змінюється миттєво в момент проходження кометою перигелію [1]. Дубяго [2] припустив, що поблизу перигелію миттєво змінюються всі елементи орбіти. Однак такі методи не дозволяли отримувати неперервну траєкторію комети. Марсден [3] запропонував наступну залежність неперервно діючих негравітаційних сил від геліоцентричної віддалі:

$$a_i = G_i e^{-r/c_r - \alpha}, \quad G_i = A_i e^{-B_i \tau}, \quad (1)$$

де a_i – компоненти негравітаційного прискорення (a .о./діб²), A_i , B_i – константи, τ – час від початкової епохи (діб), поділений на 10^4 , c і α – невід'ємні константи. Дельзєм і Міллер [4] показали, що світлові криві деяких комет дуже близькі до кривих газової продуктивності водяного снігу. Секаніна запропонував емпіричну залежність швидкості випаровування водяного снігу від геліоцентричної відстані:

$$g(r) = \alpha \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-m} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \right]^{-k}, \quad (2)$$

де $r_0 = 2,808$ а.о., $k = 4,6142$, $n = 5,093$, $m = 2,15$, $\alpha = 0,1113$.

Таблиця 1

Кентаври які мають позначення за кометною номенклатурою

| Комета | q (а.о.) | e | i (°) | P (роки) | T _J |
|-----------------------------|----------|-------|-------|----------|----------------|
| 29P/Schwassmann-Wachmann 1 | 5.767 | 0.043 | 9.4 | 14.8 | 2.984 |
| 39P/Oterma | 5.471 | 0.245 | 1.9 | 19.5 | 3.005 |
| 95P/Chiron | 8.454 | 0.383 | 6.9 | 50.7 | 3.356 |
| 165P/LINEAR | 6.830 | 0.621 | 15.9 | 76.4 | 3.095 |
| 166P/NEAT | 8.564 | 0.384 | 15.4 | 51.9 | 3.285 |
| 167P/CINEOS | 11.788 | 0.269 | 19.1 | 64.8 | 3.527 |
| 174P/Echeclus | 5.808 | 0.456 | 4.3 | 34.9 | 3.030 |
| C/2001 M10 NEAT | 5.303 | 0.801 | 28.1 | 138 | 2.586 |
| P/2004 A1 LONEOS | 5.463 | 0.308 | 10.6 | 22.2 | 2.963 |
| P/2005 S2 Skiff | 6.398 | 0.197 | 3.1 | 22.5 | 3.076 |
| P/2005 T3 Read | 6.202 | 0.174 | 6.3 | 20.6 | 3.045 |
| C/2007 S2 Lemmon | 5.558 | 0.557 | 16.9 | 44.4 | 2.883 |
| P/2008 CL94 Lemmon | 5.436 | 0.121 | 8.3 | 15.4 | 2.983 |
| P/2010 C1 Scotti | 5.235 | 0.259 | 9.1 | 18.8 | 2.959 |
| P/2010 H5 Scotti | 6.026 | 0.157 | 14.1 | 19.1 | 2.973 |
| P/2011 C2 Gibbs | 5.389 | 0.269 | 10.9 | 20.0 | 2.957 |
| C/2011 P2 PanSTARRS | 6.148 | 0.371 | 9.0 | 30.6 | 3.047 |
| P/2011 S1 Gibbs | 6.893 | 0.202 | 2.7 | 25.4 | 3.123 |
| C/2012 Q1 Kowalski | 9.480 | 0.636 | 45.2 | 132.7 | 2.632 |
| C/2013 C2 Tenagra | 9.132 | 0.430 | 21.3 | 64.2 | 3.276 |
| C/2013 P4 PanSTARRS | 5.967 | 0.596 | 4.3 | 56.7 | 3.051 |
| C/2014 F3 Sheppard-Trujillo | 5.707 | 0.645 | 6.5 | 64.4 | 2.993 |
| C/2014 W10 PanSTARRS | 7.425 | 0.604 | 73.0 | 81.2 | 1.164 |
| C/2015 D2 PanSTARRS | 5.610 | 0.567 | 31.6 | 46.6 | 2.615 |
| P/2015 M2 PanSTARRS | 5.919 | 0.175 | 4.0 | 19.2 | 3.032 |
| C/2015 T5 Sheppard-Tholen | 9.182 | 0.710 | 11.0 | 178 | 3.575 |

Марсден [5] застосував цю залежність для знаходження негравітаційних параметрів багатьох комет. В "методі Марсдена" складові негравітаційного прискорення в орбітальній системі координат спрямовані відповідно по радіус-вектору (радіальна), перпендикулярно радіус-вектору в площині орбіти (трансверсальна) і перпендикулярно до площини орбіти (нормальна):

$$a_i = G_i g(r), G_i = A_i e^{-B_i \tau} (i = 1, 2, 3), \tag{3}$$

де A_i, B_i – константи, що визначаються зі спостережень для кожної комети, τ – час (діб), який пройшов від початкової епохи. В наш час саме цей метод широко застосовується при моделюванні дій негравітаційних прискорень.

При дослідженні негравітаційних прискорень в русі комет Секаніна в роботах [6, 7] розглянув різні можливі механізми, що викликають відхилення руху комет від гравітаційного закону. На його думку, ці відхилення можуть бути викликані вибуховим процесом, що проявляється як "поштох", помітним в русі кометного ядра. Секаніна запропонував наряду з орбітальним враховувати й обертовий рух кометного ядра.

Однак негравітаційні прискорення є не єдиним фактором, що впливає на точність визначення орбіт комет. Так, в результаті сублимації речовини з поверхні комети в кому виноситься велика кількість газу й пилу. Ця речовина оточує ядро досить щільною хмарою, центр яскравості якої далеко не завжди співпадає з ядром комети. Це явище отримало в науковій літературі назву зміщення фотоцентру комети.

В роботі [8] отримана проста формула, що дозволяє обчислювати величину відстані від фотоцентру до ядра комети в залежності від газопродуктивності і геліоцентричної віддалі комети. Ця відстань складала 880 км для комети Галлея [9], та 2000 км для комети 1853 III [10].

Ще одним з ефектів сублимації речовини з поверхні ядра комети є зменшення маси і зміна форми кометного ядра. За дослідженнями, проведеними в ході останнього проходження комети Галлея через перигелій, ця комета втрачає 0,1–0,2 % своєї маси за один оберт навколо Сонця, або шар завтовшки 2,5 м (при середньому радіусі її ядра 5 км). Для комет групи Крейца ця величина досягає 20 м. Тому час життя комет на короткоперіодичній орбіті обмежений.

Недостатнє знання негравітаційних ефектів ускладнює опис динаміки багатьох комет. Негравітаційні прискорення можуть змінювати період обертання комети на величину до декількох діб. Так, наприклад, орбіта комети Галлея, отримана за спостереженнями 1835 та 1910 рр. без врахування негравітаційних ефектів, дає похибку в моменті проходження кометою перигелію в 1759 р. в 4,3 діб.

Незважаючи на вищезгадані складнощі протягом останніх років було розроблено кілька нових методів та чисельних пакетів для детального вивчення спостережуваного руху довгоперіодичних комет, для яких негравітаційні прискорення зазвичай невідомі [13].

Досить детальний огляд великої роботи з аналізу дії негравітаційних сил на комети представлений у [14]. Так, наприклад, стандартна модель Марсдена була доповнена, дозволяючи газовиділенню з ядра діяти асиметрично відносно перигелію, а для залежних від часу ефектів враховувати прецесію кометного ядра та газовиділення з дискретних активних зон на ядрі що обертається. Хоча найточніші негравітаційні моделі потребують детального апріорного знання про активність на поверхні комети та про параметри обертання ядра, стає можливим використовувати лише астрометричні дані для оцінки параметрів, що описують газовиділення комети та її обертальні характеристики.

Стандартна модель передбачає експоненційну залежність негравітаційного прискорення від геліоцентричної віддалі. Константи часу цієї змінної сили A_1, A_2 та A_3 представляють радіальну, трансверсальну та нормальну компоненти негравітаційної сили. Рішення орбіт показали, що A_3 часто помітно змінюється за декілька появ комети. Ключ-

чом для розуміння негравітаційних сил може бути краще моделювання процесів сублімації з ядра, що покращить визначення функції $g(r)$. Наприклад, загальноприйнятий закон для $g(r)$ виводиться з припущень про сферичне ізотермальне кометне ядро, з однорідної поверхні якого відбувається сублімація водяної криги. Однак, спостереження доводять, що кометні ядра несферичні, не ізотермальні, і сублімація відбувається не з усієї поверхні. Тому, як перший крок, автори [15] спробували покращити стандартну модель дозволяючи варіації у часі для параметра A_3 . Для деяких комет це значно покращило точність орбіти

Цікаво оцінити вплив негравітаційних ефектів на рух комет з "астероїдних" популяцій. Адже для розрахунку можливого зіткнення цих комет із Землею така похибка в моменті проходження перигелію може виявитись суттєвою.

Програмні пакети для дослідження впливу негравітаційних ефектів на еволюцію орбіт малих тіл Сонячної системи. В даній роботі було промодельовано орбітальну еволюцію деяких з Кентаврів що проявляють кометну активність з метою перевірки впливу негравітаційних ефектів на еволюцію орбіт цих малих тіл Сонячної системи. В ході моделювання використовувався програмний пакет HALLEY, розроблений в лабораторії малих тіл Сонячної системи Інституту Прикладної Астрономії РАН. Дистрибутив цього програмного пакету знаходяться за посиланням [11]. Цей пакет дозволяє моделювати орбітальну еволюцію комет (з врахуванням негравітаційних ефектів) та астероїдів на +1тисячу років (в майбутнє) та -5 тисяч років (в минуле).

Пакет HALLEY працює з регулярно поновлюваними базами даних комет, які містять кеплерівські орбітальні елементи, негравітаційні та фізичні параметри комет та інші відомості. Задачі, які виконує пакет HALLEY, крім зручного керування базами даних, включають також підрахунки орбітальної еволюції малих тіл та візуалізацію їхньої динаміки, виявлення тісних зближень з великими планетами за заданий інтервал часу, а також велику кількість інших задач.

Ядро програмного пакету HALLEY було розроблено на Фортрані (використовувався компілятор Intel® Fortran Compiler). Це дозволяє виконувати високоточне інтегрування рівнянь руху астероїдів та комет. В рівняннях руху враховуються гравітаційні збурення з боку всіх великих планет та Плутона. Координати збурюючих планет підраховані на основі планетних та місячних ефемерид JPL. Рівняння руху також включають релятивістські збурення від Сонця.

Збурення з боку Землі та Місяця враховуються окремо. Модель Марсдена береться для підрахування негравітаційних прискорень з параметром максимального неспівпадіння перигелію. Чисельне інтегрування рівнянь руху здійснюється з використанням методу Еверхарта 11-го порядку з автоматичним контролем кроку інтегрування. Висока точність чисельного інтегрування досягається за рахунок використання модифікованого методу Енке. Модифікація полягає в виконанні зміни оскулюючої епохи на кожному кроці інтегрування. Параметри незбуреного руху підраховані з підвищеною у чотири рази точністю завдяки використанню змінних з 32 знаками після коми.

Діапазони негравітаційних прискорень комет та постановка задачі. Сервіс Лабораторії Реактивного руху (Пасадена, США) JPL Small-Body Database Search Engine [12] наводить орбітальні та деякі з фізичних параметрів для 3377 комет. Лише 140 з них мають інформацію про значення принаймні одного з негравітаційних параметрів A_1 , A_2 , A_3 , які входять у розрахунки за моделлю Марсдена. Внаслідок великих відстаней, на яких Кентаври рухаються навколо Сонця, їх періоди зазвичай складають декілька десятків років. Про кометну активність в Кентаврах стало відомо порівняно нещодавно (25 років тому), менше ніж типовий період обертання Кентавра. Тому активні Кентаври ще не мають даних щодо значень складових їх негравітаційних прискорень, викликаних кометною активністю, адже для цього необхідні спостереження в повторних поверненнях такої комети до Сонця.

За даними по 140 кометах з відомими значеннями принаймні одного з негравітаційних параметрів A_1 , A_2 , A_3 за екстремальними значеннями цих параметрів можна оцінити діапазони негравітаційних параметрів для найбільш вивчених комет (див. табл. 2). Так, найменше виміряне значення негравітаційного радіального параметру $A_1 = 7.5e-11$ має комета 7P/Pons-Winnecke, найбільше значення параметра $A_1 = 7.3e-05$ у комети 316P/LONEOS-Christensen. Щодо складової A_2 (негравітаційний трансверсальний параметр), то модуль його виміряних значень лежить у межах від $9.4e-13$ (комета 96P/Machholz 1) до $2.4e-07$ (комета 205P/Giacobini-B). Для негравітаційного нормального параметра A_3 діапазон модулів значень лежить у межах від $4.0e-11$ (комета 67P/Churyumov-Gerasimenko) до $6.9e-07$ (комета 287P/Christensen).

Таблиця 2

Деякі екстремальні значення параметрів A_1 , A_2 , A_3 для найбільш вивчених комет

| комета | q (а.о.) | Q (а.о.) | Період, роки | A_1 (а.о./діб ²) | A_2 (а.о./діб ²) | A_3 (а.о./діб ²) | DT (діб) |
|---------------------------|------------|------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1P/Halley | 0.586 | 35.08 | 75.3 | 2.70E-10 | 1.60E-10 | | |
| 7P/Pons-Winnecke | 1.239 | 5.6 | 6.32 | 7.50E-11 | -1.20E-11 | -1.40E-10 | 149 |
| 65P/Gunn | 2.91 | 4.88 | 7.69 | 5.00E-09 | 5.50E-09 | -1.20E-08 | -315 |
| 67P/Churyumov-Gerasimenko | 1.243 | 5.68 | 6.44 | 9.90E-10 | 1.10E-10 | 4.00E-11 | |
| 96P/Machholz 1 | 0.124 | 5.94 | 5.28 | 1.10E-10 | -9.40E-13 | | |
| 147P/Kushida-Muramatsu | 2.756 | 4.86 | 7.43 | 2.70E-07 | -6.90E-08 | 1.60E-07 | 305 |
| 205P/Giacobini-A | 1.526 | 5.55 | 6.66 | 1.40E-08 | -1.70E-08 | | |
| 205P/Giacobini-B | 1.53 | 5.68 | 6.84 | 7.80E-06 | -2.40E-07 | | |
| 205P/Giacobini-C | 1.527 | 5.55 | 6.66 | 6.30E-09 | 2.30E-10 | | |
| 287P/Christensen | 3.054 | 5.3 | 8.54 | 9.80E-07 | 2.20E-07 | -6.90E-07 | |
| 316P/LONEOS-Christensen | 3.608 | 5.05 | 9 | 7.30E-05 | | | |

Максимальне неспівпадіння дат проходження перигелію завдяки врахуванню дії негравітаційного прискорення, викликаного кометною активністю, сягає -315 діб для комети 65P/Gunn ($q = 2.910$ а.о., $Q = 4.88$ а.о., $A_1 = 5.0e-09$, $A_2 = 5.5e-09$, $A_3 = -1.2e-08$) та 305 діб для комети 147P/Kushida-Muramatsu ($q = 2.756$ а.о., $Q = 4.86$ а.о., $A_1 = 2.7e-07$, $A_2 = -6.9e-08$, $A_3 = 1.6e-07$).

Оскільки для активних Кентаврів поки що невідомі значення відповідних параметрів негравітаційного прискорення, в даній роботі для моделювання впливу кометної активності на рух і еволюцію орбіт Кентаврів було застосовано значення цих параметрів для комети Галлея. Ця комета має період обертання навколо Сонця близький до орбіта-

льних періодів Кентаврів, відвідує частину простору між орбітами Юпітера та Нептуна (хоча й виходить за їх межі). До того ж цю комету людство спостерігає найбільш тривалий час, в її 30 поверненнях до Сонця.

З метою вивчення впливу негравітаційних ефектів на рух Кентаврів було промодельовано їх орбітальну еволюцію з врахуванням негравітаційних параметрів (таких як для комети Галлея) на тисячу років в майбутнє (до 3 березня 3000 р.) за допомогою пакету Halley. В результаті отримано дані щодо дат проходження перигеліїв та тісних зближень з планетами для двох випадків моделювання – з врахуванням і без врахування модельних негравітаційних прискорень внаслідок кометної активності. Розрахунки проводилися для комети Галлея та для 6 найближчих до Сонця активних Кентаврів – комет 29P/Schwassmann-Wachmann 1, 95P/Chiron, 165P/LINEAR, 166P/NEAT, 167P/CINEOS, 174P/Echeclus.

Результати. Результати моделювання впливу негравітаційного прискорення на орбітальну еволюцію активних Кентаврів наводяться у табл. 3.

Таблиця 3

Результати моделювання впливу негравітаційного прискорення на орбітальну еволюцію деяких активних Кентаврів та комети Галлея

| Комета | DT, діб:год:хв:сек, за один оберт комети | DT, діб:год:хв:сек за весь час інтегрування | DR, а.о., за один оберт комети | DR, а.о., за весь час інтегрування |
|---------------------------|---|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Галлея | 03:11:56:05 | 87:02:38:24 | 0.63719993e-4 | 24.42434233e-4 |
| 29P/Schwassmann-Wachmann1 | 00:00:01:19 | 00:17:16:48 | 0.00001855e-4 | 0.21289429e-4 |
| 95P/Chiron | 00:00:00:03 | 00:00:00:01 | 0.00008471e-4 | 0.00000186e-4 |
| 165P/LINEAR | 00:00:00:01 | 00:00:03:26 | 0.00004223e-4 | 0.00019406e-4 |
| 166P/NEAT | 00:00:00:01 | 00:00:00:01 | 0.00004540e-4 | 0.00000120e-4 |
| 167P/CINEOS | 00:00:00:01 | 00:00:00:04 | 0.00000301e-4 | 0.00006905e-4 |
| 174P/Echeclus | 00:00:00:04 | 00:00:02:41 | 0.00157023e-4 | 21.7028205e-4 |

В даній таблиці DT означає зсув в даті проходження перигелію, за модулем, як різниця значень для моделювання без врахування негравітаційних ефектів та моделювання з врахуванням негравітаційного прискорення. Дані наводяться для розрахунку на 1 оберт комети та в наступній колонці для всього періоду інтегрування. DR означає різницю за модулем в перигелійній відстані комети як різницю значень для моделювання без врахування негравітаційних ефектів та моделювання з врахуванням негравітаційного прискорення. Ці дані також наводяться для розрахунку на 1 оберт комети та в наступній колонці для всього періоду інтегрування.

Розглядаючи вплив на орбітальну еволюцію негравітаційних ефектів, викликаних кометною активністю в деяких Кентаврах, слід зауважити, що Кентаври обертаються навколо Сонця на великих віддальх від Сонця, де кометна активність керується не сублимацією водяної криги, а інших летких, що є наявними у меншій кількості. Активність Кентаврів дуже слабка, ядра цих комет значно більші за ядра більш близьких до Сонця комет, тож і вплив негравітаційних ефектів на їхній рух має бути меншим за наведені вище оцінки. Тому при моделюванні еволюції орбіт врахування негравітаційних ефектів, викликаних кометною активністю в деяких Кентаврах, несуттєво впливає на характер зміни їх орбіт. Проте з часом дані зміни накопичуються.

Оскільки Кентаври мають хаотичні орбіти в динамічно активній області (в полі гравітаційного впливу планет-гігантів), і параметри негравітаційних прискорень саме для цих комет поки що невідомі, то еволюцію орбіт Кентаврів слід розглядати статистично, для ансамблю об'єктів в цілому, а не для окремих тіл. В такому випадку врахуванням негравітаційних ефектів в активних Кентаврах можна знехтувати.

Висновки. При моделюванні еволюції орбіт активних Кентаврів за один оберт врахування негравітаційних прискорень найбільш вплинуло на орбіти комет 29P/Schwassmann-Wachmann 1, 174P/Echeclus, 95P/Chiron.

Моделі негравітаційного руху все ще дуже непевні, тож можна лише робити припущення про оцінки очікуваних відстаней для розв'язків негравітаційних орбіт. В цілому, не було отримано значних різниць в даті проходження перигелію між гравітаційними орбітами та негравітаційними (з врахуванням кометної активності в деяких Кентаврах). З часом дані зміни накопичуються. Так, за повний період інтегрування (близько однієї тисячі років) найбільш помітних змін зазнали орбіти комет 29P/Schwassmann-Wachmann 1, 165P/LINEAR, 174P/Echeclus.

Максимальна різниця за модулем в перигелійній відстані комети за один оберт склала 23,55 км для 174P/Echeclus і 325542 км за одну тисячу років для тієї ж комети.

Оскільки Кентаври мають хаотичні орбіти в динамічно активній області (в полі гравітаційного впливу планет-гігантів), для тих задач, коли доцільно розглядати еволюцію орбіт всього комплексу тіл (фактично модулювання) еволюцію їх орбіт слід розглядати статистично, для ансамблю об'єктів в цілому, а не для окремих тіл. В такому випадку врахуванням негравітаційних ефектів в активних Кентаврах можна знехтувати. Для тих задач, коли потрібно аналізувати еволюцію орбіт окремих тіл, доцільно застосовувати уточнюючі припущення для оцінки дії негравітаційних прискорень з урахуванням таких параметрів як маса і розміри тіла, параметри обертання ядра, рівень його активності, можлива геометрія активних зон на ньому тощо.

Список використаних джерел

1. Маковер С.Г. Комета Энке-Баклунда. Сообщение первое. Движение за 1937–1951 гг. // Труды ИТА. 1955. Вып.4.
2. Дубяго А.Д. Движение периодической кометы Брукса 2 с 1883 по 1946 гг. // Ученые записки Казанского университета, 1950. Т.110.
3. Marsden, B.G. (1969). Comets and nongravitational forces. II. Astron. J., V. 74: P. 720–734.
4. Delsemme A.H., Miller D.C. Physico-Chemical Phenomena in Comets. III / Planet.Space Sci. 1971. V. 19. P. 1229.
5. Marsden B. G., Sekanina Z., and Yeomans D. K., Comets and Nongravitational forces. V., AJ, 78, p. 211–225.
6. Sekanina, Z. : 1979, Icarus 38, pp. 300–316.
7. Sekanina, Z. Effects of the law for nongravitational forces on the precession model of comet Encke AJ, vol. 91, p. 422–431.
8. Medvedev Yu.D. On the dust cloud in a comet's head and its role in forming the photocenter shift phenomena, Asteroids, Comets. Meteors. 1993.
9. Yeomans D. K. and Chodas P. W., Cometary orbit determination and nongravitational forces, AJ, 98, 1989, pp.1083–93.

10. *Buttner H.*, AN, 207, 1918, P. 179–182.
 11. <http://www.ipa.nw.ru/halley/en/download.html>.
 12. http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi#x.
 13. *Dybczyński, Piotr A.; Królikowska, Małgorzata* Towards a better understanding of the apparent source/sources of long period comets// Planetary and Space Science, 2016 V.123, p. 77–86.
 14. *Yeomans, D. K.; Chodas, P. W.; Sitarski, G.; Szutowicz, S.; Królikowska, M.* Cometary orbit determination and nongravitational forces//Comets II, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 2004., p. 137–151.
 15. *Aksnes, K.; Mysen, E.* Nongravitational Forces on Comets: An Extension of the Standard Model//The Astronomical Journal, 2011, V. 142, Issue 3, article id. 81, 4pp.

Надійшла до редколегії 11.07.16

N. Kovalenko, Ph.D.
 Astronomical Observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv

ESTIMATION OF THE NON-GRAVITATIONAL EFFECTS ON THE CENTAURS ORBITS EVOLUTION

In this work the orbital evolution of some active Centaurs is considered for one thousand years with and without nongravitational accelerations. An impact assessment of nongravitational effects on Centaurs' orbits is made. It is shown that a shift in the date of perihelion passage for Centaurs population objects under consideration ranges from 1 second to 79 seconds for one orbit period and from 1 sec to 0.72 days for the entire period of integration (a thousand years).

Н. Коваленко, канд. физ.-мат. наук
 Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЭВОЛЮЦИЮ ОРБИТ КЕНТАВРОВ

В работе рассмотрена орбитальная эволюция некоторых активных Кентавров на одну тысячу лет с учётом и без учета негравитационных ускорений. Получена оценка влияния негравитационных эффектов на эволюцию орбит Кентавров. Показано, что смещение по дате прохождения перигелия для рассмотренных объектов популяции Кентавров достигает от 1 до 79 сек за один оборот и от 1 до 0,72 сут. за весь период интегрирования (около тысячи лет).

УДК 524.8

В. І. Жданов, д-р фіз.-мат. наук, проф.
 Астрономічна Обсерваторія Київського національного університету
 імені Тараса Шевченка
 КНУ імені Тараса Шевченка
 О. С. Сташко, студ. фіз. ф-ту,
 Київський національний університет
 імені Тараса Шевченка

РУХ ПРОБНИХ ТІЛ У СТАТИЧНОМУ ГРАВИТАЦІЙНОМУ ПОЛІ СФЕРИЧНО-СИМЕТРИЧНОЇ СКАЛЯРНО-ПОЛЬОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ В ЗАГАЛЬНІЙ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Досліджено часткові точні розв'язки спільної системи рівнянь Ейнштейна та рівнянь скалярного поля з мінімальним зв'язком та ненульовим потенціалом самодії, які описують сферично-симетричні статичні конфігурації у випадку асимптотично-плоского простору-часу за наявності голої сингулярності у центрі. Для цих розв'язків проаналізовано рух пробних тіл, що взаємодіють тільки гравітаційно. Знайдено умови, за яких існують незв'язні області стійких колових орбіт. Показано існування траєкторій з нульовим кутовим моментом, коли частинки "зависають" на певній відстані від центру.

1. Вступ та базові співвідношення. Скалярні поля використовують в моделях динамічної темної енергії, де їхня присутність забезпечує вирішення відомих проблем горизонту та площинності (див., напр., [1–3]). Зазвичай вважають, що ці поля відігравали важливу роль на дуже ранніх стадіях еволюції Всесвіту, але в сучасну епоху їх вплив на будову релятивістських астрофізичних об'єктів є нехтовно малим. Разом із тим добре відомо, що наявність малого скалярного поля в загальній теорії відносності (ЗТВ) може кардинально міняти топологічну структуру простору-часу гравітуючої конфігурації [3–5] – зокрема, призводити до появи голої сингулярності (ГС). Втім, це не завжди може бути помітним з точки зору віддаленого спостерігача. Індикатором наявності (або відсутності) ефектів скалярного поля може бути структура розподілу колових орбіт. Зокрема, у випадку розв'язку [4, 5] з безмасовим скалярним полем виникають області стійких колових орбіт, що не перетинаються [6].

Ми розглядаємо це питання на прикладі часткових розв'язків спільної системи рівнянь Ейнштейна та рівнянь скалярного поля з ненульовим потенціалом самодії, що описують сферично-симетричну статичну конфігурацію з асимптотично-плоским простором-часом та голою сингулярністю у центрі. Обговорення голих сингулярностей у ЗТВ має тривалу історію. За гіпотезою Пенроуза ГС не виникають в реальних астрофізичних системах, але ця гіпотеза наразі не є ні строго доведеною, ані спростованою (див., напр., обговорення у книзі [3]).

Функціонал дії за наявності самогравітуючого скалярного поля ϕ є

$$S = S_{GR} + \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \phi_{,\mu} \phi_{,\nu} - V(\phi) \right], \quad (1)$$

де S_{GR} – стандартна гравітаційна дія загальної теорії відносності (див., напр., [2, 3]), $V(\phi)$ – потенціал самодії скалярного поля, який буде уточнено нижче. Метрика статичного сферично-симетричного простору-часу в "квазіглобальних" координатах [7,8] має вигляд

$$ds^2 = A(x) dt^2 - \frac{1}{A(x)} dx^2 - r^2(x) (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\varphi^2). \quad (2)$$