



УДК 521+523.6

Орбітальна еволюція комет 95P/Хірон, 39P/Отерма, 29P/Швассмана–Вахмана 1 і 33-х Кентаврів

Н.С. Коваленко¹, К.І. Чурюмов^{1,2}, Ю.Г. Бабенко²¹Київський планетарій Товариства “Знання” України²Астрономічна Обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

В даній роботі було проведено чисельне моделювання еволюції орбіт 34-х об'єктів групи Кентаврів і 2-х віддалених комет групи Юпітера — 39P/Отерма та 29P/Швассмана–Вахмана 1 із використанням метода Еверхарта. В результаті були отримані еволюційні треки елементів орбіт 33-х Кентаврів і 3-х комет (95P/Хірон, 29P/Швассманна–Вахманна 1 і 39P/Отерма) на 1 мільйон років в минуле та майбутнє. Проведено статистичний аналіз результатів чисельного інтегрування, виявлені тренди в змінах орбіт Кентаврів в минулому та майбутньому. Визначена частка Кентаврів, котрі потенційно можуть проявити себе як комети, за значеннями розподілів перигелійних відстаней промодельованих орбіт. Показано, що Кентаври можуть переходити на орбіти комет родини Юпітера, і навпаки. Кентаври є одним із можливих джерел для поповнення популяції комет родини Юпітера, але необхідні також й інші джерела.

ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМЕТ 95P/ХИРОН, 39P/ОТЕРМА, 29P/ШВАССМАНА–ВАХМАНА 1 И 33-Х КЕНТАВРОВ, Коваленко Н.С., Чурюмов К.И., Бабенко Ю.Г. — В данной работе было проведено численное моделирование эволюции орбит 34-х объектов группы Кентавров и 2-х удаленных комет группы Юпитера — 39P/Отерма и 29P/Швассмана–Вахмана 1 с применением метода Эверхарта. В результате были получены эволюционные треки элементов орбит 33-х Кентавров и 3-х комет (95P/Хирон, 29P/Швассманна–Вахманна 1 и 39P/Отерма) на 1 миллион лет в прошлое и будущее. Проведен статистический анализ результатов численного интегрирования, выявлены тренды в изменениях орбит Кентавров в прошлом и будущем. Определена доля Кентавров, которые потенциально могут проявить себя как кометы, по значениям распределений перигелийных расстояний промоделированных орбит. Показано, что Кентаври могут переходить на орбиты комет семейства Юпитера, и наоборот. Кентаври являются одним из возможных источников для пополнения популяции комет семейства Юпитера, но необходимы также и другие источники.

ORBITAL EVOLUTION OF 95P/CHIRON, 39P/OTERMA, 29P/SHWASSMANN-WACHMANN 1, AND OF 33 CENTAURS, by Kovalenko N.S., Churyumov K.I., Babenko Yu.G. — The paper is devoted to numerical modeling of orbital evolution of 34 Centaurs, and 2 distant Jupiter-family comets — 39P/Oterma and 29P/Shwassmann-Wachmann 1. As a result the evolutionary tracks of orbital elements of 33 Centaurs and 3 comets (95P/Chiron (2060), 39P/Oterma and 29P/Shwassmann-Wachmann 1) are obtained. The integrations were produced for 1 Myr back and forth in time starting at epoch and using the implicit single sequence Everhart methods. The statistical analysis of numerical integrations results was done, trends in changes of Centaurs' orbital elements in the past and in the future are revealed. The part of Centaurs that are potential comets is defined by the values of perihelia distributions for modeled orbits. It is shown that Centaurs may transits into orbits typical for Jupiter-family comets, and vice versa. Centaurs represent one of possible sources for replenishment of JFCs population, but other sources are also necessary.

Ключевые слова: орбитальная динамика комет; эволюция Кентавров.

Key words: orbital evolution of comets; evolution of Centaurs.

1. ВСТУП

Об'єкти групи Кентаврів розміщені між орбітами Юпітера та Нептуна. Перший представник популяції Кентаврів, 2060 Хірон, було відкрито у 1977 р. (Чарльз Ковал). Він рухається по орбіті з періодом $P = 50,2$ років, $a = 13,6$ а.о., $e = 0,38$, $i = 6,94$. В афелії Хірон знаходиться на 18,8 а.о. від Сонця, а в перигелії він наближається до Сонця на 8,5 а.о.

У 1988 році Толеном [1] була зафіксована кометна активність Хірона. Це видається нетиповим для об'єктів на такій значній геліоцентричній відстані. Зафіксована кометна активність Хірона може слугувати підтвердженням поширеної думки, начебто Кентаври являють собою перехідну популяцію від занептунових тіл Поясу Койпера до короткоперіодичних комети сімейства Юпітера.

Походження Хірона та решти Кентаврів є однією з найбільш інтригуючих проблем фізики Сонячної системи, яка ще остаточно не вирішена. Моделювання динамічної еволюції Кентаврів засобами чисельного моделювання дозволяє зробити певні висновки щодо походження Кентаврів, їхнього теперішнього динамічного стану та можливих майбутніх сценаріїв еволюції цієї популяції. У цій роботі ми провели моделювання орбітальної еволюції для 34-х об'єктів популяції Кентаврів, та для 2 віддалених комет сімейства Юпітера, а саме комет 39P/Отерма та 29P/Швассманн–Вахманн 1. І комета 29P/Швассманна–Вахманна, і 39P/Отерма мають типові для Кентаврів орбіти. Комета 39P/Отерма в наш час не проявляє активності, і, як передбачається, була активною лише до того, як внаслідок збурень з боку Юпітера в 1963 році перейшла на орбіту, характерну для Кентаврів [2]. Слабка комета

38P/Стефана–Отерма, скоріш за все, не проявляла б коми, якби її перигелій був за межами орбіти Юпітера, понад 5 а.о.

2. МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Чисельне моделювання орбітальної еволюції обраних Кентаврів було проведено на 1 мільйон років у майбутнє та в минуле. Було використано програму, що базується на вирішенні задачі 7 тіл (з планетами від Юпітера до Плутона). Вона дозволяє промодельювати орбітальну еволюцію, підрахувати зміни орбітальних елементів з часом, знайти мінімальну відстань між об'єктом групи Кентаврів та планетами-гігантами протягом кожного періоду обертання, знайти кореляцію між тісними зближеннями з планетами та орбітальною еволюцією.

У програмі було використано неявні пошагові алгоритми Еверхарта [3]. Шаг інтегрування змінний. Похибка, що задавалась, становила 10^{-12} . Інтегрування припинялося, коли велика піввісь перевищувала 100 а.о. Початкові орбітальні елементи об'єктів були взяті з [4].

В результаті, було побудовано графіки еволюції орбітальних елементів Кентаврів та тісних зближень з планетами.

Окрім чисельного моделювання орбіт з початковими орбітальними елементами, рівними елементам Кентаврів, 12 варіаційних орбіт з трохи відмінними орбітальними елементами (± 1 в останньому знаку після коми) були прослідковані на ± 200 тисяч років для кожної з 3-х комет: 2060 Хірон, 39P/Отерма та 29P/Швассманн–Вахманн 1.

3. ОРБИТАЛЬНА ЕВОЛЮЦІЯ ХІРОНА

Дослідження динамічної еволюції Хірона мають велику історію. Чисельні інтегрування було проведено для різних часових проміжків у майбутнє та в минуле [5–11]. Було показано, що в теперішній час Хірон знаходиться під впливом гравітації Сатурна, і обертається по орбіті з хаотичними змінами [5]. Marsden [7] відмітив, що здатність передбачити орбіту втрачається, якщо інтегрування простягається талі тісного зближення з Сатурном. Трохи відмінні початкові значення можуть призвести до цілком відмінної орбіти [6].

Моделювання динамічної еволюції Хірона та інших Кентаврів виявило різноманіття індивідуальних еволюційних шляхів. Було показано, що їхній динамічний час життя порядку $10^{5,5} - 10^{6,5}$ років. Зміни орбіт хаотичні внаслідок тісних зближень з сусідніми планетами-гігантами.

Еволюція орбіти Хірона як у майбутнє, так і в минуле має схожий характер, хоча можна побачити деяку асиметрію у часі. Загальний висновок такий, що минула та майбутня орбіта Хірона залишається невідомою на великому проміжку часу, і чисельне інтегрування має лише статистичний сенс. Тому у цій роботі ми розглядаємо динамічну еволюцію Хірона на основі загальних тенденцій у змінах орбіт Кентаврів.

Прояв кометної активності Хіроном може бути обраний як критерій для розв'язання цієї проблеми. Його активність на таких великих геліоцентричних відстанях передбачає існування на поверхні Хірона летких з малою температурою сублімації. Дійсно, якби Хірон перебував на орбіті з малим q протягом тривалого часу у минулому, леткі, що розглядаються як можливе пояснення активності Хірона, мали б випаруватися. Тому, можна припустити, що Хірон не знаходиться на його теперішній орбіті протягом тривалого часу.

Внаслідок виявленої активності 2060 Хірона (на сьогодні це не єдиний активний об'єкт з групи Кентаврів) представляє інтерес виявити модельні орбіти з малими перигелійними відстанями для інших Кентаврів. Такі орбіти можуть призвести до “пробудження” кометної природи в інших Кентаврах.

4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОРБИТАЛЬНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ ДЛЯ 3-Х КОМЕТ

Детальні дослідження орбітальної історії Хірона раніше були проведені в роботах [8–11]. Вони вели орбітальну еволюцію Хірона статистично, у термінах теорії імовірності.

В підрахунках [9] на 200 тисяч років у минуле орбіта Хірона зменшилася від 20–40 а.о. до теперішнього значення у 75% випадків. Зокрема, було 3 випадки прямого захоплення через єдину зустріч з планетою від $a = 100 - 400$ а.о. Протягом майбутніх 200 тисяч років близько 70% орбіт збільшилися до 20–30 а.о. від теперішнього значення.

У роботі [8] автори вказали на асиметрію минуле/майбутнє, яку не дуже добре видно у підрахунках [9]. Їхня еволюція перигелійної відстані q виглядає більш складною, ніж еволюція великої півосі a . Близько половини q -орбіт залишалися між 12 а.о. та теперішнім значенням, в той час як інша половина показала дуже хаотичні зміни між теперішнім значенням та 1–2 а.о. Такі захоплення на орбіти з $q = 1 - 2$ а.о. є тимчасовими і рідко стабільними на більш ніж 2–3 тисячі років.

Наші результати також демонструють цю асиметрію минуле/майбутнє. Аналіз 13-ти орбіт показує можливість частих тісних зближень з планетами-гігантами, із Сатурном часом на відстані менше 0,1 а.о. Тісні зближення з Ураном досягають значень близько 0,25 а.о., з Нептуном — 0,3 а.о. Тісне зближення із

Сатурном на відстань 0,006 а.о. близько 400 тисяч років у нашому моделюванні у майбутнє спричинило викид Хірона з орбіти, близької до сучасної, і мало результатом значне збільшення великої півосі (більше ніж 100 а.о.). Хаотичність у змінах орбітальних елементів була також виявлена у моделюванні 12-ти варіаційних орбіт.

Маємо наступну статистику по інтегруванні 13-ти орбіт для Хірона. Для еволюції у минуле було 8 випадків, коли велика піввісь зменшилася порівняно із значеннями, які вона досягала до того (20–80 а.о.), у 4-х випадках вона була в межах деяких відхилень від сучасного значення, і в 1-му випадку вона збільшилася від 4 а.о. У 6-ти випадках q збільшилося, у 4-х залишилося на сучасному рівні, і у 3-х випадках зменшилося до теперішнього значення. Для моделювання у майбутнє було 6 випадків з незначними змінами великої півосі a , 4 випадки збільшення а до 17–40 а.о., і 3 випадки зменшення a . Щодо перигелійної відстані q , було 5 випадків зменшення і 5 випадків, коли вона залишалася на сучасному рівні q . У 3-х випадках моделювання у майбутнє показало збільшення перигелійної відстані до 13 а.о.

Моделювання орбітальної еволюції комети Отерма у минуле показало меншу різноманітність характеристик зміни великої півосі a . Для всіх 13-ти орбіт a у минулому була значно більше (в 11-ти випадках досягала 100 а.о. та більше) і зменшилася до теперішнього значення. Щодо перигелійної відстані q , 5 випадків показали q більше ніж зараз, 5 випадків — менше, у 3-х випадках q не змінилося істотно. У майбутньому орбітальне інтегрування показало загальну тенденцію (12 випадків) збільшення великої півосі а до значень у 40–100 а.о. та більше. В 1-му випадку a істотно не змінилося. Інтегрування для q показало рівноімовірні можливості для збільшення і зменшення його значення (по 4 орбіти) і 5 випадків без помітної тенденції до збільшення або зменшення.

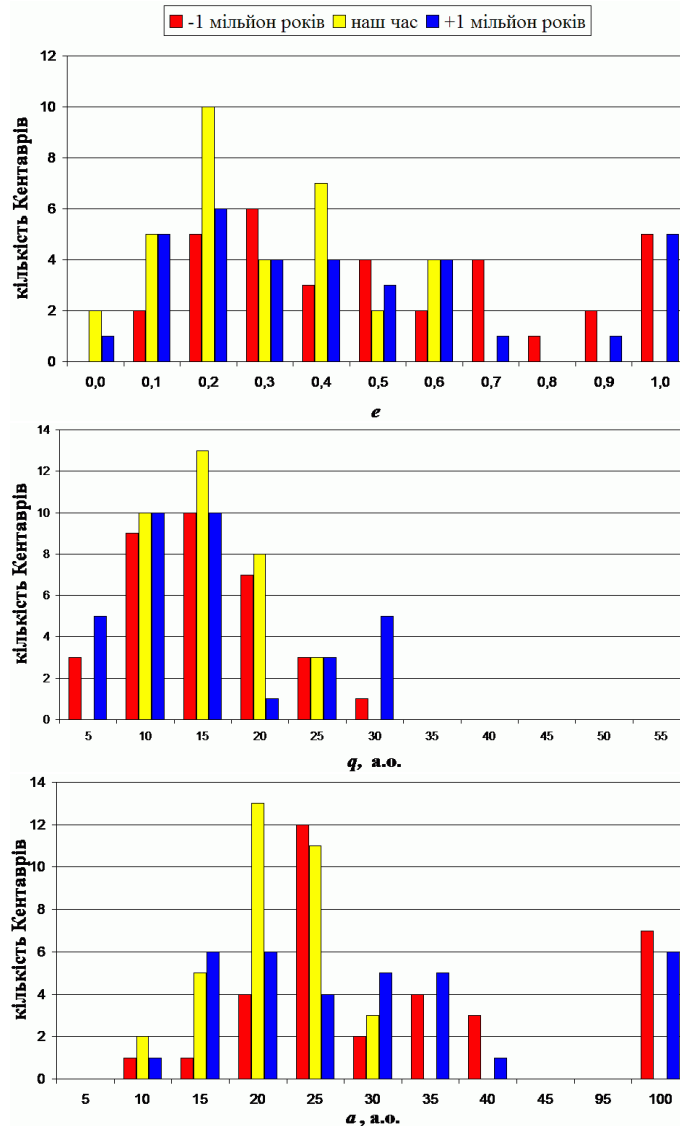


Рис. 1. Зміни з часом у розподілі орбітальних елементів 34-х Кентаврів за ексцентриситетом e , перигелійною відстанню q , та великою піввіссю a

Результати для моделювання орбітальної еволюції комети Швасманн–Вахманн 1 мають більше варіацій. У минулому більшість орбіт (12 з 13-ти) показали більшу велику піввісь a , ніж сьогодні. В 1-му випадку у минулому a зросло від 3–4 а.о. до теперішнього значення. У 7-ми випадках q істотно не змінилося, у 3-х випадках воно зменшилося від 10–20 а.о., і в 3-х випадках воно збільшилося від 2-4 а.о. до 6 а.о.

У майбутньому у більшості випадків (9 орбіт) велика піввісь збільшується до 20–100 а.о., у 3-х випадках вона на рівні сучасного значення, і в 1-му випадку можливе зменшення a до 3 а.о. Перигелійна відстань q у 6-ти випадках збільшиться до 9–14 а.о., у 4-х випадках вона зменшиться до 1–2,5 а.о., і в 3-х випадках вона флюктує з амплітудою 2–8 а.о.

5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОРБІТАЛЬНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ 34-Х КЕНТАВРІВ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Статистика для моделювання орбіт для 33-х Кентаврів і 2060 (95P/) Хірона наводиться на рис. 1. З моделювання орбітальної еволюції 34-х Кентаврів ми маємо такі результати:

1. Орбітальна еволюція Кентаврів дуже хаотична, і характеризується відносно частими тісними зближеннями з планетами-гігантами. У деяких випадках серед Кентаврів трапляються процеси, у яких частинки передаються з-під гравітаційного впливу однієї планети до іншої. Деякі Кентаври перебувають у чисельних різних резонансах, в той час як інші зовсім уникають резонансів. Випадки викиду з сонячної системи, так само як і перехід на орбіти з меншими q також не рідкісні. Тобто можна вважати, що Кентаври можуть переходити на орбіти короткоперіодичних комет родини Юпітера, і навпаки.

2. Більшість значень перигелійних відстаней Кентаврів протягом періоду інтегрування знаходяться у межах 5–30 а.о. У теперішній час найбільш населеним є регіон 6–20 а.о. (91%), у майбутньому тільки 61% об'єктів мають перигелії у цій області, а у минулому — близько 79%.

3. Більшість значень великих півосей Кентаврів містяться в інтервалі 5–40 а.о. Загальна тенденція в еволюції a на тривалі проміжки часу показує більш симетричну поведінку по відношенню до майбутнього та минулого. У теперішній час 85% Кентаврів мають півосі розміщені у межах значень 10–25 а.о. У минулому ця ділянка містить 49% півосей Кентаврів, а у майбутньому 46%.

4. Наші інтегрування показали, що доля об'єктів із перигелійними відстанями менше 5 а.о. (можливі кандидати в активні комети) у минулому складає 9%, в той час як в майбутньому вона становить 15%. В той самий час доля об'єктів з великою піввіссю менше 10 а.о. у минулому та в майбутньому становить 3–4% (в теперішній час ця доля становить 6%).

5. Еволюція гістограм розподілів орбітальних елементів 34-х Кентаврів і двох комет родини Юпітера в минулому та майбутньому показує, що Кентаври можуть переходити на орбіти комет родини Юпітера, і навпаки. Кентаври є одним із можливих джерел для поповнення популяції комет родини Юпітера; для поповнення цієї родини необхідні також і інші джерела.

6. Чисельне інтегрування орбітальної еволюції 2060 Хірона показує, що цей об'єкт може розглядатися як типовий представник Кентаврів.

Для подальшого дослідження зв'язку між Кентаврами та короткоперіодичними кометами є корисним порівняти фізичні характеристики таких об'єктів, підрахувати орбітальну еволюцію для більшого числа Кентаврів та комет сімейства Юпітера, порівняти результати із застосуванням різних чисельних методів, врахувати гравітаційний вплив від усіх карликових планет.

1. *Tholen D.J., et al.* Object 2060 Chiron // IAU Circ. — 1998. — **4554**. — P. 2.
2. *Mazzotta Epifani E., Palumbo, Capria, Cremonese, et al.* The dust coma of the active Centaur P/2004 A1 (LONEOS): a CO-driven environment? // *Astronomy & Astrophysics*. — **460** (3). — P. 935–944.
3. *Everhart E.* Implicit single sequence methods for integrating orbits // *Celestial Mechanics*. — 1974. — **10**. — P. 35–55.
4. <http://ssd.jpl.nasa.gov/data/>
5. *Oikawa S., Everhart E.* Past and future orbit of 1977 UB, object Chiron // *Astronomical Journal*. — 1979. — **84**. — P. 134–139.
6. *Scholl H.* History and evolution of Chiron's orbit // *Icarus*. — 1979. — **40**. — P. 345–349.
7. *Kowal C.T., Liller W., Marsden B.G.* The discovery and orbit of /2060/ Chiron // in: *Symposium on the Dynamics of the Solar System, 23–26 May 1978, Tokio, Japan, (A79-36276 15-89)* Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., P. 245–250.
8. *Hahn G., Bailey M.E.* Rapid dynamical evolution of giant comet Chiron // *Nature* — 1990. — **348**. — P. 132–136.
9. *Nakamura Ts., Yoshikawa M.* Orbital evolution of giant comet-like objects // *Celestial Mechanics*. — 1993. — **57**. — P. 113–121.
10. *Tiscareno M.S., Malhotra R.* The dynamics of known Centaurs // *Astron.J.* — 2003. — **126**, Is. 6. — P. 3122–3131.
11. *Horner J., Evans N.W., Bailey M.E.* Simulations of the Population of Centaurs I: The Bulk Statistics // *Mon. Not. of the Royal Astron. Soc.* — 2004. — **354** (3). — P. 798–810.

Надійшла до редакції 18.11.2011