

УДК 523.532

П. Б. Бабаджанов¹, Г. И. Кохирова¹, Ю. В. Обрубов²

¹Институт астрофизики Академии наук Республики Таджикистан
Бухоро 22, Душанбе, Таджикистан, 734042
kokhirova2004@mail.ru

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Калужский филиал, Баженова 2, Калуга, Россия, 248000

О кометной природе околоземного астероида 2003 EH1

Исследована дифференциальная эволюция орбит астероида (186256) 2003 EH1, сближающегося с Землей, и кометы 96P/Мачхольца 1 на интервале времени 28000 лет под действием планетных возмущений. Применялся D_{SH} -критерий Саутворта и Хокинса близости орбит. Показано, что комета и астероид могут быть фрагментами ядра одной и той же более крупной кометы-родоначальницы комплекса Квадрантид. Дробление кометы-родоначальницы, возможно, произошло около 9500 лет назад. Околоземный объект 2003 EH1 в действительности является угасшим осколком ядра прародительской кометы. Сделан вывод, что комета 96/P Мачхольца 1, околоземный астероид 2003 EH1 группы Амура и метеороидный рой Квадрантид образуют семью родственных объектов.

ПРО КОМЕТНУ ПРИРОДУ НАВКОЛОЗЕМНОГО АСТЕРОЇДА 2003 EH1, Бабаджанов П. Б., Кохірова Г. І., Обрубов Ю. В. — Досліджено диференціальну еволюцію орбіт астероїда (186256) 2003 EH1, що наближається до Землі, та комети 96P/Мачхольца 1 на інтервалі часу 28000 років під дією планетних збурень. Використовувався D_{SH} -критерій Саутворта і Хокінса близькості орбіт. Показано, що комета і астероїд можуть бути фрагментами ядра однієї великої комети-родоначальниці комплексу Квадрантид. Руйнування комети-родоначальниці, можливо, відбулося 9500 років тому. Навколоземний об'єкт 2003 EH1 насправді є згаслим осколком ядра материнської комети. Зроблено висновок, що комета 96/P Мачхольца 1, навколоземний астероїд 2003 EH1 групи Амура і метеороїдний рій Квадрантид складають сім'ю споріднених об'єктів.

ON COMETARY NATURE OF NEAR-EARTH ASTEROID 2003 EH1, by Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I., Obrubov Yu. V. — The differential

orbital evolution of the near-Earth asteroid (NEA) 2003 EH1 and comet 96P/Machholz 1 was investigated under the perturbing action of major planets for the time interval of 28 thousand years. The values of Southworth and Hawkins Dsh criterion of orbital similarity and its variation were calculated over this period. It was shown that comet and asteroid can be fragments of the same larger comet-progenitor of the Quadrantid complex. A break-up of the parent comet occurred possibly near 9500 years ago. The near-Earth object 2003 EH1 is really the dormant fragment of the parent comet's nucleus. A conclusion was made that comet 96P/Machholz 1, Amore group near-Earth asteroid (186256) 2003 EH1 and Quadrantids meteoroid stream form the complex of related objects.

Введение. К настоящему времени установлено, что некоторые астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), являются угасшими кометами. Значительными индикаторами кометной природы таких АСЗ является кометоподобная орбита и наличие связанных с ними метеороидных роев и наблюдаемых метеорных потоков. Первая ассоциация между метеороидным роем Геминиды и астероидом (3200) Фаэтон была выявлена Уипплом [17]. Также было открыто некоторое количество АСЗ, двигающихся по орбитам, находящимся внутри комплекса Таурид, в котором также перемещается и комета 2P/Энке [1, 4, 14]. Позднее было обнаружено, что астероид 2003 EH1 движется по той же орбите, что и метеороидный рой Квадрантиды [5, 10, 19]. В работах [2, 6, 7] установлены три ассоциации, каждая из которых состоит из нескольких АСЗ и соответствующего метеороидного роя. Показано, что в пределах каждой ассоциации метеороидный рой и АСЗ имеют очень схожие орбиты и, очевидно, общее происхождение. Вследствие этого появилась общепринятая гипотеза о том, что каждая такая ассоциация является результатом разрушения большей родительской кометы метеороидного роя, и следовательно, эти «астероиды» на самом деле являются угасшими фрагментами комет, и для их спецификации используется термин «околоземный объект» (ОЗО). Все упомянутые ассоциации выявлены на основе сходства орбит ОЗО и метеороидного роя, который порождает наблюдаемые метеорные потоки в настоящее время. Такие ассоциации принято называть астероидно-метеороидными комплексами [3]. Исследование известных комплексов и выявление новых является одной из актуальных задач изучения малых тел Солнечной системы, поскольку результаты позволяют выявить связи между ними и установить их происхождение.

Околоземные объекты комплекса Квадрантид. АСЗ группы Амура (186256) 2003 EH1 был открыт 6 марта 2003 г. в Ловелловской обсерватории (США). Абсолютная звездная величина 2003 EH1 составляет $H = 16.67^m$, а эквивалентный диаметр $d = 2.32$ км. По наблюдениям астероида вычислена его орбита и сразу стала очевидна ее схожесть с орбитой известного метеорного потока Квадрантид [11]. На основе простого сравнения элементов орбит астероида и потока

Таблица 1. Элементы современных орбит кометы 96P/Мачхолца 1, астероида 2003 EH1 и метеорного потока Квадрантиды (J2000.0)

| Объект | a , а. е. | e | q , а. е. | i , град | ω , град | Ω , град | T_j |
|---------------|-------------|------|-------------|------------|-----------------|-----------------|-------|
| 96P/Мачхолц 1 | 3.03 | 0.96 | 0.12 | 58.31 | 14.76 | 94.32 | 1.94 |
| 2003 EH1 | 3.12 | 0.62 | 1.19 | 70.88 | 171.35 | 282.96 | 1.96 |
| Квадрантиды | 3.14 | 0.69 | 0.99 | 71.88 | 171.20 | 283.30 | 1.95 |

Квадрантид было сделано предположение, что 2003 EH1 является наиболее вероятным родительским телом метеороидного роя Квадрантид.

Действительно, из всех объектов, ранее рассмотренных в качестве возможного родительского тела роя Квадрантид, а именно кометы 96P/Мачхолца 1, кометы 1491 I, астероида 5496 (1973NA), в настоящее время наиболее близкую к Квадрантидам орбиту имеет АСЗ 2003 EH1 [5, 10—12, 18, 19]. Элементы современных орбит кометы 96P/Мачхолца 1, астероида 2003 EH1 [<http://newton.dm.unipi.it/neodys/neodys.cat>, <http://neo.jpl.nasa.gov>] и метеороидного роя Квадрантиды [5] приведены в табл. 1, где a — большая полуось, e — эксцентриситет, q — перигелийное расстояние, i — наклон, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота перигелия, T_j — статистика критерия Тиссерана, позволяющего разделять орбиты объектов на кометный и астероидальный типы [13].

Одной из характеристик типа эволюции орбит астероидов и комет является кратность пересечения их орбит с орбитой Земли, т. е. число пересечений за один цикл изменения аргумента перигелия орбиты объекта от 0 до 360°. Пересечение может происходить только в узлах орбиты малого тела, когда гелиоцентрические расстояния восходящего и нисходящего узлов R_a и R_d примерно равны радиусу-вектору Земли:

$$R_{a,d} = \frac{a(1 \pm e^2)}{1 \pm e \cos \omega} \approx 1 \text{ а. е.},$$

где знак «плюс» соответствует R_a , а знак «минус» — R_d орбиты [4]. Когда заданы значения a и e , приведенное уравнение может иметь от одного до восьми корней для значения ω , и следовательно, кратность пересечений может принимать значения от 0 до 8. Соответственно метеороидный рой, связанный с рассматриваемым объектом, может произвести до восьми метеорных потоков, наблюдаемых на Земле. Среди околоземных объектов наиболее распространенным является случай четырехкратного пересечения, а наиболее редким — восьмикратного пересечения.

Исследования эволюции орбиты роя Квадрантид показали, что он является восьмикратным пересекателем орбиты Земли. По результатам наблюдений было выявлено восемь метеорных потоков, порождаемых этим роем. Одним из них является метеорный поток Квадрантид.

Родственная связь астероида с роем Квадрантид, в дополнение к близости их современных орбит, доказана также результатами исследования эволюции их орбит [5]. На основе проведенных исследований был сделан вывод, что астероид 2003 EH1 является наиболее подходящим родительским телом (или остатком родительского тела) Квадрантид. Так как этот астероид связан с восемью наблюдаемыми метеорными потоками, то можно предположить, что он представляет собой ядро угасшей кометы.

С другой стороны, не исключено возможное родство астероида 2003 EH1 с короткопериодической кометой семейства Юпитера 96P/Мачхолца 1, открытой в мае 1986 г. Дональдом Мачхолцем. Специальные поиски этой кометы по вычисленной эфемериде на пластинках, полученных на телескопах с большим полем зрения и предельной звездной величиной до $+19^m$ до момента открытия кометы, не дали результата [9]. В тоже время выявлено, что по крайней мере каждые три из четырех ее прохождений перигелия были благоприятны для наблюдений [15]. Наиболее логичное объяснение этого факта заключается в предположении, что вплоть до 1986 г. комета находилась в неактивном, «спящем» или угасшем состоянии [9, 15]. Исследование эволюции орбиты кометы показало, что она так же, как околоземный астероид 2003 EH1 и метеороидный рой Квадрантид, является восьмикратным пересекателем орбиты Земли. Возникает закономерный вопрос — возможно ли, что комета, астероид и метеороидный рой Квадрантид, порождающий восемь потоков, образуют единый комплекс?

В этой работе мы представляем результаты исследования предположения, что активная комета Мачхолца и угасшая комета 2003 EH1 являются родственными телами, образовавшимися в результате дробления ядра одной прародительской кометы.

Эволюция орбит кометы Мачхолца и АСЗ 2003 EH1. Отметим в первую очередь близкие значения критерия Тиссерана (табл. 1), указывающие на кометную природу исследуемых объектов и на их возможную взаимосвязь. Если распад кометы был частью ее истории, то можно ожидать, что несколько больших осколков будут наблюдаться в метеороидном рое. Такие фрагменты должны эволюционировать по тому же пути, что и рой.

Дробление астероидов и комет на крупные фрагменты происходит с небольшими скоростями разлета. Небольшие скорости разлета фрагментов обуславливают на начальном этапе и незначительные различия элементов орбит. Поэтому при установлении связи объектов необходимо исследовать эволюцию орбит и найти момент их наибольшего сходства. Если такое сходство найдено, то этот момент можно принять за момент разделения фрагментов.

Для исследования эволюции орбит используются различные численные методы интегрирования дифференциальных уравнений возмущенного движения многих тел. В этой работе мы использовали метод Эверхарта [8] для вычисления дифференциальных планетных

возмущений. При создании модели мы вычисляли гравитационные возмущения от всех восьми больших планет Солнечной системы с учетом их взаимных возмущений.

В результате вычисления оскулирующих элементов орбит выявлено, что у этих объектов совпадает эволюционный тип — они оба являются восьмикратными пересекателями орбиты Земли с большими диапазонами изменений наклонов, эксцентриситетов и перигелийных расстояний. Долгопериодические изменения перигелийных расстояний q и гелиоцентрических расстояний восходящего (R_a) и нисходящего (R_d) узлов орбит объектов на интервале 28 тысяч лет приведены на рис. 1—3.

Определение момента наибольшей схожести орбит кометы и астероида. На данном этапе необходимо сравнить орбиты кометы и астероида на длительном интервале времени и найти момент их наибольшего совпадения.

В качестве меры близости орбит объектов мы использовали самый важный и наиболее часто используемый D_{SH} -критерий Саутворта и Хокинса [16]. Для вычисления статистики D_{SH} используются пять элементов сравниваемых орбит:

$$D_{SH}^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + 2 \sin \frac{i_2 - i_1}{2} \sin i_1 \sin i_2 + 2 \sin \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \sin \omega_1 \sin \omega_2 + 2 \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sin \Omega_1 \sin \Omega_2.$$

Считается, что малые тела могут иметь общее происхождение, если значение статистики D_{SH} для их орбит не превосходит 0.20.

Вычисленные значения величины D_{SH} для кометы Мачхолца и объекта 2003 EH1 на временном интервале 28 тыс. лет приведены на рис. 3. Видно, что наименьшее значение $D_{SH} = 0.029$, и следовательно, наибольшее совпадение орбит имело место в 7415—7465 гг. до н. э., т. е. около 9500 лет назад. Элементы орбит объектов в момент наибольшего совпадения приведены в табл. 2.

Обсуждение. Сравнительный анализ показывает, что в течение длительного времени наибольшая близость орбит объектов наблюдается всего один раз, причем в этот момент орбиты пересеклись в об-

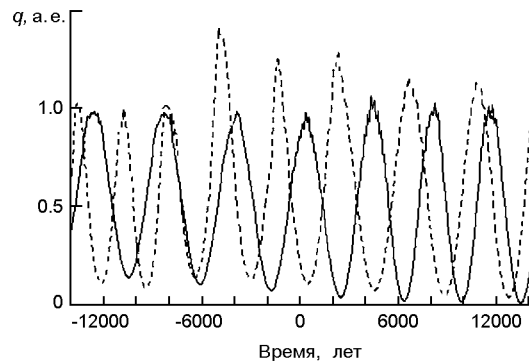


Рис. 1. Долгопериодические изменения перигелийных расстояний q орбит кометы Мачхолца (сплошная кривая) и 2003 EH1 (штриховая кривая)

Рис. 2. Долгопериодические изменения R_a (штриховая кривая) и R_d (сплошная кривая) орбиты астероида 2003 ЕН1 (а) и орбиты кометы 96/Р Мачхолца 1 (б) на интервале 28 тыс. лет. Расстояние 1 а. е. соответствует моментам пересечения с орбитой Земли

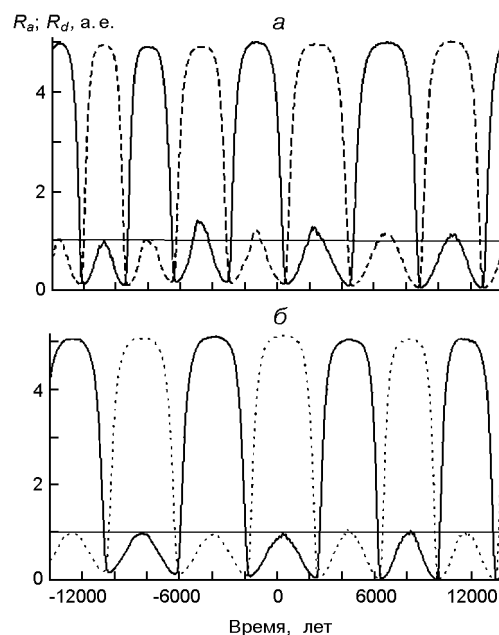


Рис. 3. Изменение статистики D_{SH} между орбитами 2003 ЕН1 и кометы Мачхолца на интервале 28 тыс. лет. Стрелкой указан момент наибольшего сближения

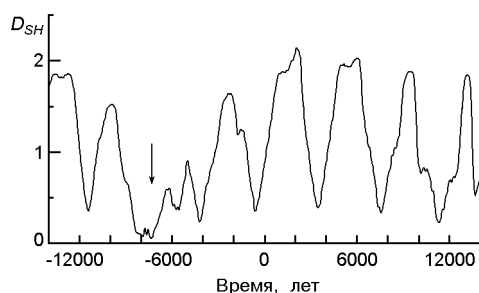


Таблица 2. Элементы орбит кометы 96Р/Мачхолца 1 и астероида 2003 ЕН1 на 7415 г. до н. э. (J2000.0)

| Объект | a , а. е. | e | q , а. е. | i , град | Ω , град | ω , град | T_j |
|---------------|-------------|-------|-------------|------------|-----------------|-----------------|-------|
| 96Р/Мачхолц 1 | 3.037 | 0.795 | 0.622 | 65.82 | 13.28 | 98.56 | 1.94 |
| 2003 ЕН1 | 3.039 | 0.798 | 0.615 | 65.03 | 15.55 | 97.78 | 1.96 |

ласти перигелия, который в тот период составлял примерно 1 а. е. При отсутствии возмущений орбиты постоянно проходили бы через точку разделения (дробления), т. е. пересекались бы в этой точке. Однако эта информация со временем пропадает из-за различных возмущений как гравитационной, так и негравитационной природы. Следовательно, такое пересечение не наблюдалось раньше, и не будет встречаться позже.

Одной из причин разделения кометы-прародительницы может быть столкновение с другим объектом. Хотя такое событие и является маловероятным, но его нельзя исключать. Другой причиной может быть приливное притяжение Солнца, Земли, Венеры на предыдущих

этапах эволюции. На исследуемом интервале времени было множество сближений объектов с Солнцем, с Землей и Венерой на расстояниях менее 0.05 а. е., в то время как тесных сближений с Юпитером на расстоянии менее 0.2 а. е. было всего два-три.

Результаты исследования динамических свойств показали, что комета Мачхолца и объект 2003 EH1 при любом сценарии распада родительской кометы с большой вероятностью имеют общее происхождение; распад общего родителя на эти два фрагмента произошел почти 9.5 тыс. лет назад, и астероид 2003 EH1 в реальности является угасшим осколком кометы.

Заключение. Таким образом, найденный момент времени можно рассматривать как момент дробления ядра кометы-прародительницы комплекса Квадрантид. Можно также предположить, что комета и астероид являются крупными фрагментами ядра той кометы. В результате в настоящий момент комплекс включает в себя активную комету 96P/Мачхолца 1, околоземный объект (186256) 2003 EH1, являющийся угасшим фрагментом ядра прародительской кометы, и метеороидный рой Квадрантид с его восемью метеорными потоками. Имеет смысл продолжить поиск аналогичных угасших фрагментов, образовавшихся в результате дробления прародительской кометы, среди околоземных астероидов.

1. Asher D. J., Clube S. V. M., Steel D. I. Asteroids in Taurid complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1993.—**264**.—P. 93—105.
2. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I., Khamroev U. Kh. The Sigma-Capricornids complex of near-Earth objects // Adv. Space Res.—2015.—**55**.—P. 1784—1791.
3. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I., Obrubov Yu. V. Extinct comets and asteroid-meteoroid complexes // Solar Syst. Res.—2015.—**49**, N 3.—P. 165—172.
4. Babadzhanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I. Near-Earth objects in the Taurid complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2008.—**386**, N 3.—P. 1436—1442.
5. Babadzhanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I. Meteor showers associated with 2003 EH1 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2008.—**386**.—P. 2271—2277.
6. Babadzhanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I. Near-Earth asteroids among the Iota Aquariids meteoroid stream // Astron. and Astrophys.—2009.—**507**, N 2.—P. 1067—1072.
7. Babadzhanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I. Near-earth asteroids among the Scorpriids meteoroid complex // Astron. and Astrophys.—2013.—**556**, N 1.—P. A25 (5 p.).
8. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits // Celes. Mech.—1974.—**10**, N 1.—P. 35—55.
9. Green D. W. E., Rickman H., Porter A. C., Meech K. J. The strange periodic comet Machholz // Science.—1990.—**247**, N 4946.—P. 1063—1067.
10. Jenniskens P. 2003 EH1 is the Quadrantid shower parent comet // Astron. J.—2004.—**127**.—P. 3018—3022.
11. Jenniskens P., Marsden B. G. 2003 EH1 and the Quadrantids // IAU Circ.—2003.—**8252**, N 2.
12. Kanuchova Z., Neslusan L. The parent bodies of the Quadrantid meteoroid stream // Astron. and Astrophys.—2007.—**470**.—P. 1123—1136.

13. *Kresak L.* On the similarity of orbits of associated comets, asteroids and meteoroids // Bull. Astron. Inst. Czech-Sl.—1982.—**33**.—P. 104—110.
14. *Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2010 TU149 in the Taurid complex // European Planetary Science Congress 2012, held 23-28 September, 2012 in Madrid, Spain.—id. EPSC2012-886.
15. *Sekanina Z.* Periodic comet Machholz and its idio syncrasesies // Astron. J.—1990.—**99**, N 4.—P. 1268—1278.
16. *Southworth R. B., Hawkins G. S.* Statistics of meteor streams // Smith. Contrib. Astrophys.—1963.—**7**.—P. 261—285.
17. *Whipple F. L.* 1983 TB and the Geminid meteors // IAU Circular.—1983.—**3881**.
18. *Wiegert P., Brown P.* The Quadrantid meteoroid complex // Icarus.—2005.—**179**.—P. 139—157.
19. *Williams I. P., Ryabova G. O., Baturin A. D., Chernetsov A. M.* The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2004.—**355**.—P. 1171—1181.

Статья поступила в редакцию 01.12.15