

ДИНАМИЧЕСКАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМЕТ: ДОЛЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, КОМЕТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Д.Ф. Лупишко, В.В. Емельяненко, Е.Е. Бирюков

Работа посвящена фундаментальной проблеме современной астрономии: выявлению физических свойств, характерных для комет и кометных астероидов. Получено, что доля кометных астероидов составляет $(10 \pm 5) \%$ от общего количества астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ).

Введение

Еще не так давно кометы и астероиды рассматривались как совершенно разные популяции малых тел в Солнечной системе. Однако в последнее десятилетие появляется все больше наблюдательных данных и результатов численного моделирования, которые свидетельствуют о тесных взаимосвязях между кометами и астероидами. Это - обнаружение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), находящихся на кометоподобных орбитах ($Q \geq 4,5$ а.е.); сходство некоторых физических и оптических свойств (альbedo, цвет, поляризационные характеристики, форма, скорость вращения и др.) кометных ядер с низкоальbedными астероидами; обнаружение кометоподобной активности ряда астероидов [1]. Более глубокое понимание этих связей, а также процессов динамической и физической эволюции комет в «кометные астероиды», представляет интерес не только с точки зрения космогонических проблем малых тел Солнечной системы, т.е., фундаментальной науки, но и с точки зрения прикладной - проблема астероидно-кометной опасности, наличие водяного льда на астероидах и т.п.

Идея о возможном существовании среди АСЗ ядер потухших комет (т.е., исчерпавших свою активность) была высказана Эпиком еще в 1963 г. [2]. В настоящее время таких переходных между кометами и астероидами объектов (comet-asteroid transition objects), которые периодически проявляют признаки кометной активности, известно несколько (см., напр., [3]). Это - 7968 Elst-Pizarro = 133P/E-P в главном поясе, 4015 Wilson-Harrington = 107P/W-H среди АСЗ, C/2001 OG108 среди Дамоклоидов и другие. Динамическая эволюция (т.е., эволюция орбиты) таких объектов изучена больше, чем физическая (см., напр., [4]).

Основным механизмом пополнения популяции АСЗ является так называемый, резонансный механизм, когда астероид главного пояса или его фрагмент размером $D < 20$ км, образовавшийся в результате катастрофического разрушения родительского тела, под действием эффекта Ярковского попадает в зону резонанса среднего движения с Юпитером 3:1 (или векового резонанса v_6), где испытывает хаотическое возрастание эксцентриситета, в результате его орбита эволюционирует так, что с течением времени начинает пересекать орбиты планет земной группы. Как показывают оценки, главный пояс астероидов является основным источником пополнения и поддержания АСЗ-популяции в стабильном состоянии.

Возникает естественный вопрос, а какова же доля АСЗ кометного происхождения? Оценки, полученные в прошлом веке (до 2000 г.), содержали практически весь спектр возможных значений. Так, Эпик [2] считал, что большинство из этих объектов как раз являются ядрами потухших комет. Б.Ю. Левин и А.Н. Симоненко (Москва) в 1981 г. возражали против кометной природы большинства АСЗ, поскольку последние являются родительскими телами метеоритов, которые не могли сформироваться в ядрах комет. Г. Везерилл в США оценил долю АСЗ кометного происхождения в 40 % (1988 г.), а Р. Бинзел и др. в 1992 г. заключили ее в пределы от нуля до 40 %. В то же время, Э. Тедеско и Дж. Градье в 1987 г. считали, что если кометные ядра и встречаются среди АСЗ, то крайне редко (ссылки на эти оценки содержатся в статье [5]).

Накопление большего количества данных о физических и орбитальных свойствах АСЗ и комет, безусловно, способствовало более точным оценкам доли кометных ядер среди астероидов, сближающихся с Землей, появившихся в 2001 г. и позже.

Физические характеристики комет и астероидов

Как известно, кандидаты на кометное происхождение должны, как правило, удовлетворять следующим требованиям: а) это должны быть низкоальбедные астероиды D-, P- и C-типов, содержащие наиболее примитивное вещество, которое широко представлено во внешней части пояса астероидов и на его периферии (группы Кибелы, Гильды, Троянцев); б) они должны иметь более медленное осевое вращение по сравнению со средним значением, характерным для АСЗ, и в среднем, более вытянутую форму; в) они также должны находиться на кометных орбитах и быть связанными с метеорными потоками. Лупишко и Лупишко [5] провели сравнительный анализ физических свойств и типов минералогии АСЗ, астероидов главного пояса и, частично, ядер комет, а также данных о возможной связи АСЗ с метеорными потоками и пришли к заключению, что основным источником пополнения астероидов групп Амура, Аполлона и Атона является главный пояс астероидов, а доля АСЗ кометного происхождения не превышает 10 %.

Определению и анализу геометрических альbedo и размеров АСЗ на кометоподобных орбитах посвящена статья [6]. Построенная авторами зависимость альbedo АСЗ и комет от величины их постоянной Тиссерана показывает резкий разрыв в точке $T = 3$. В левой части зависимости ($T < 3$) оказались кометы и 9 из 10-ти низкоальбедных астероидов. В правой части ($T > 3$) сосредоточены средне- и высокоальбедные АСЗ (35 объектов). Среднее альbedo для этих двух групп объектов составляет:

$$0,038 \pm 0,043 \text{ для } T \leq 3, \text{ и} \\ 0,215 \pm 0,147 \text{ для } T > 3.$$

На основании этих данных авторы делают вывод о том, что доля АСЗ кометного происхождения является значительной и составляет, по крайней мере, 9 %.

В этом же 2001 г. была получена еще одна оценка [7]. Анализируя относительное количество низкоальбедных объектов, обнаруженных к тому времени среди АСЗ и учитывая влияние наблюдательной селекции, автор оценивает долю кометных ядер в популяции АСЗ величиной порядка 5 %.

Предполагая пять основных областей, которые могут быть источниками АСЗ, в работе [8] была построена динамическая модель, которая с учетом эффектов селекции хорошо описывает распределение орбит и абсолютных звездных величин (до $H = 22^m$) популяции АСЗ. При этом долгопериодические кометы и кометы галлеевского типа, как источники АСЗ, не рассматривались. Результаты моделирования показали, что группы Амура, Аполлона и Атона содержат 32 ± 1 %, 62 ± 1 % и 6 ± 1 % объектов АСЗ популяции, соответственно. При этом, ~ 61 % АСЗ приходят из внутренней части главного пояса ($a < 2,5$ а.е.), ~ 24 % – из центральной ($2,5 < a < 2,8$ а.е.), ~ 8 % – из внешней ($a > 2,8$ а.е.) и 6 % – из комет семейства Юпитера [4, 8].

Еще одна оценка получена в работе [9]. Авторы проанализировали спектральные свойства АСЗ разных типов и оценили распределение типов с учетом эффектов наблюдательной селекции. При этом они использовали только два критерия, характеризующих кометную природу АСЗ, это – постоянная Тиссерана ($T < 3$) и соответствие спектра C, D или P-типу астероидов. Они пришли к выводу, что доля ядер потухших комет среди АСЗ составляет 10–18 %.

Астероиды и кометы на орбитах галлеевского типа

Другой аспект проблемы кометных астероидов заключается в определении источника их происхождения. Поскольку кометные астероиды – кометы, исчерпавшие кометную активность, источник у кометных астероидов и комет должен быть один.

Особый интерес представляют астероиды и кометы на орбитах галлеевского типа. Эти тела движутся на орбитах с параметром Тиссерана $T < 2$ и периодом обращения вокруг Солнца $20 < P < 200$ лет. Поскольку эти объекты движутся по сильно наклоненным и обратным орбитам, их источником может быть только почти изотропное сферическое облако Оорта [10–12]. В работе [13] на основании фотометрических наблюдений отмечалось, что дамоклоиды не могут происходить из пояса Эджеворта–Койпера, следовательно их источник – облако Оорта. Сравнительный анализ физических свойств галлеевских астероидов и комет может дать информацию о физических изменениях кометных ядер при их угасании. Применительно к кометам семейства Юпитера (КСЮ) подобный анализ провести трудно, поскольку источником КСЮ может быть как пояс Эджеворта–Койпера [14, 15], так и облако Оорта [12, 16, 17]. Однако проведение такого анализа осложня-

ется малым число обнаруженных дамоклоидов (около 35 С переигелииным расстоянием $q < 5$ а.е.) и их большим периодом обращения вокруг Солнца. Мы рассмотрели угасание и разрушение ядер комет галлеевского типа, захваченных из облака Оорта. Нами было получено, что на орбитах галлеевского типа должно существовать ~ 10 дамоклоидов, пересекающих орбиту Земли. Следовательно малое число обнаруженных дамоклоидов объясняется не эффектами наблюдательной селекции, а результатом физических процессов в ядрах комет, в результате чего на орбитах с $q < 1$ а.е. количество активных КГТ и дамоклоидов сопоставимо.

Заключение

Таким образом, можно подытожить, что последние оценки доли астероидов кометного происхождения, которые могут сближаться и пересекать орбиту Земли, в среднем согласуются с величиной 10 ± 5 %. Представляется, что эта величина может существенно зависеть от диапазона размеров АСЗ. А это очень важно с точки зрения проблемы астероидно-кометной опасности: либо объект, который находится на трассе сближения с Землей и угрожает возможным столкновением, является фрагментом астероида главного пояса с объемной плотностью $2-6$ г/см³, либо же это ядро потухшей кометы со средней плотностью $\sim 0,5$ г/см³, которое претерпит сильную фрагментацию и испарение при входе в плотные слои земной атмосферы. Если принять во внимание, что источником АСЗ кометного происхождения могут быть разные динамические группы комет, то надо учитывать и такой фактор как связь физических характеристик комет (состав) с местами их образования и/или эволюцией [18, 19]. Для распознавания таких объектов и для более надежной оценки их относительного количества необходимо знать и уметь определять характерные для них физические характеристики. Такие исследования представляются в настоящее время исключительно актуальными.

Следует особо выделять исследование комет галлеевского типа и дамоклоидов, поскольку только для этих объектов облако Оорта является основным источником пополнения. Из анализа физических характеристик КГТ и дамоклоидов можно выделить особенности, характерные для объектов из облака Оорта. Благодаря чему можем определить, какова доля комет семейства Юпитера из облака Оорта и пояса Эджеворта-Койпера. Что в свою очередь даст нам ключ к пониманию всей структуры внешней части Солнечной системы: пояс Эджеворта-Койпера, диск рассеянных объектов, внутреннее и внешнее составляющие облака Оорта.

Емельяненко В.В. и Бирюков Е.Е. благодарят РФФИ (грант № 06-02-16512) за поддержку.

Литература

1. Hsieh, H.H. 2006. Active asteroids: mystery in the Main Belt / H.H. Hsieh, D. Jewitt // Proceed. of IAU Symp. 229: Asteroids, Comets, Meteors. Aug. 7 - 12, 2005. Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. Cambridge Univ. Press. - P. 425-437.
2. Opik, E.J. The stray bodies in the solar system. Part I. Survival of cometary nuclei and the asteroids / E.J. Opik // Adv. Astron. Astrophys. - 1963. - V. 2. - P. 219-262.
3. Toth, I. Connection between asteroids and cometary nuclei / I. Toth // Proceed. of IAU Symp. 229: Asteroids, Comets, Meteors. Aug. 7 - 12, 2005. Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. Cambridge Univ. Press. - P. 67-96.
4. The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids / W.F. Bottke, D. Vokrouhlichy, D.P. Rubincam, M. Broz // In: ASTEROIDS III. Eds. R.P. Binzel et al. Univ. of Arizona Press, Tucson (USA). - 2002. - P. 395-408.
5. Лупишко, Д.Ф. Об источниках происхождения астероидов, сближающихся с Землей / Д.Ф. Лупишко, Т.А. Лупишко // Астрон. Вестник. - 2001. - Т. 35, № 3. - С. 250-256.
6. Fernandez, Ya.R. Low albedos among extinct comet candidates / Ya.R. Fernandez, D.C. Jewitt, S.S. Sheppard // Astrophys. J. - 2001. - V. 553. - P. L197-L200.
7. Whiteley, R.J. A compositional and dynamical survey of the near-Earth asteroids / R.J. Whiteley // PhD. thesis. University of Hawaii. - 2001. - 189 p.
8. Bottke, W.F.Jr. Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects / W.F.Jr. Bottke, A. Morbidelli, R. Jedicke, et al // Icarus. 2002. - V. 156, № 2. - P. 399-433.

9. Binzel, R.P. Observed spectral properties of near-Earth asteroids: results from population distribution, source regions, and space weathering processes / R.P. Binzel, A.S. Rivkin, J.S. Scott *et al* / *Icarus*. - 2004. - V. 170, № 2. - P. 259-294.
10. Emel'yanenko, V.V. Capture of Halley-type comets from the near-parabolic flux / V.V. Emel'yanenko, M.E. Bailey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* - 1998. - V. 298. - P. 212-222.
11. Emel'yanenko, V.V. From the Solar system comet cloud to near-Earth space / V.V. Emel'yanenko // *Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets* // *Proc. IAU Coll. 173*. Eds.: J. Svoren, E.M. Pettich, and H. Rickman, *Astron. Inst. Slovak Acad. Sci., Tatranska Lomnica*. - 1999. - P. 339-344.
12. Бирюков, Е.Е. Захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа и орбиты семейства Юпитера / Е.Е. Бирюков // *Астрон. Вестник*. - 2007. - Т. 41, № 3. - С. 232-240.
13. Jewitt D. A first look at the damocloids / D. Jewitt // *Astron. J.* - 2005. - V. 129. - P. 530-538.
14. Morbidelli, A. An overview on the Kuiper belt and on the origin of Jupiter-family comets / A. Morbidelli // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. - 1999. - V. 72. - P. 129-156.
15. Fernandez, J.A. Are there many inactive Jupiter-Family Comets among the Near-Earth asteroid population? / J.A. Fernandez, T. Gallardo, A.N. Brunini // *Icarus*. - 2002. - V. 159. - P. 358-368.
16. Emel'yanenko, V.V. Structure and Dynamics of the Centaur Population: Constraints on the Origin of Short-Period Comets / V.V. Emel'yanenko // *Earth, Moon, and Planets*. - 2006. - V. 97. - P. 341-351.
17. Fernandez J.A. The transfer of comets from parabolic orbits to short-period orbits: Numerical studies / J.A. Fernandez, T. Galardo // *Astron. And Astrophys.* - 1994. - 281. - P. 911-922.
18. A'Hearn, M.F. The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992 / M.F. A'Hearn, R.L. Millis, D.J. Schleicher, *e/ all/ Icarus*. 1995. - V. 118. - P. 223-270.
19. Schleicher, D.G. Comet taxonomy and evolution / D.G. Schleicher // *Asteroids, Comets, Meteors 1993* // Eds: A. Milani, M. Di Martino, A. Cellino. - Dordrecht (Germany): Kluwer Acad. Publ. - 1994. - P. 415-428.

Поступила в редакцию 17 сентября 2007 г.