

**ОЦЕНКА ВОЗРАСТА МОЛОДЫХ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ  
ОРБИТАХ: ПАРА (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49**

**В. С. Сафронова, Э. Д. Кузнецов**  
*Уральский федеральный университет*

Изложены основные идеи метода определения возраста молодых пар астероидов на близких орбитах по результатам анализа вероятностной эволюции орбит. В качестве примера получены оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49, которые составляют от 7.8 до 8.2 тыс. лет.

**AGE ESTIMATION OF YOUNG PAIRS OF ASTEROIDS IN CLOSE ORBITS:  
PAIR (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49**

**V. S. Safronova, E. D. Kuznetsov**  
*Ural Federal University*

The main ideas of the method for determining the age of young pairs of asteroids in close orbits based on the results of the analysis of the probabilistic evolution of orbits are presented. As an example, estimates of the age of the pair (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 were obtained, which range from 7.8 to 8.2 kyr.

## Введение

Исследование динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах представляет особый интерес с точки зрения задачи поиска молодых объектов среди малых тел Солнечной системы. Образование пар астероидов может происходить в результате действия различных процессов: распада быстровращающегося родительского тела [1], вторичного деления образующихся при распаде тел [2], кратерообразующего столкновения с почти критически вращающимся родительским астероидом [3], каскадного разрушения родительского тела группы или семейства [4]. Современное состояние проблемы изучения молодых пар астероидов представлено в работе [5]. Новые фотометрические данные в целом подтверждают механизм образования пар, предложенный в [1].

Для оценки близости кеплеровых орбит удобно использовать метрики Холшевникова, определение и свойства которых детально изложены в работах [6, 7]. Совместный анализ метрик  $\varrho_2$  и  $\varrho_5$  позволяет выявлять кандидатов в молодые пары астероидов [8–10]. Метрика  $\varrho_2$  определяет расстояние в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит: большой полуоси  $a$ , эксцентриситета  $e$ , наклона  $i$ , долготы восходящего узла  $\Omega$  и аргумента перигентра  $g$ . Метрика  $\varrho_5$  определяет расстояние в трехмерном фактор-пространстве позиционных элементов  $a$ ,  $e$ ,  $i$ . Близость этих метрик указывает на то, что орбиты близки не только по своим размерам и форме, но и имеют близкую ориентацию в пространстве. Это может указывать на молодость пары.

В работе [10] на основе анализа метрик  $\varrho_2$  и  $\varrho_5$  были выделены кандидаты в молодые пары астероидов. При выборе кандидатов использовались следующие критерии:  $\varrho_2 < 0.001$  (а. е.)<sup>1/2</sup>,  $\varrho_5 < 0.001$  (а. е.)<sup>1/2</sup> и  $\varrho_2 - \varrho_5 < 0.0001$  (а. е.)<sup>1/2</sup>. Последующий анализ результатов численного моделирования на основе номинальных орбит при варьировании

скорости дрейфа большой полуоси, обусловленной влиянием эффекта Ярковского, позволил выявить несколько молодых пар. Динамическая эволюция пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 исследована в [11], получены оценки возраста пары.

В настоящей работе обосновывается использование метода исследования вероятностной эволюции при получении оценок возраста молодых пар астероидов на примере пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49.

## Описание методики исследования

При исследовании вероятностной эволюции для каждого астероида генерировалось 1000 клонов орбит на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений [12]. Этот метод заключается в записи ковариационной матрицы в виде  $C = LL^T$ , где  $L$  — нижняя треугольная матрица. Выборка из 1000 клонов генерируется на основе номинальных элементов  $\varepsilon_{0k}$ , где  $1 \leq k \leq 6$ , как  $\varepsilon_k = \varepsilon_{0k} + r_j L_{kj}$ . Здесь выполняется суммирование по повторяющемуся индексу  $j$  для  $j \leq k$ , а  $r_j$  — 6-мерный вектор с независимо генерируемыми компонентами на основе нормального распределения с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Моделирование динамической эволюции астероидов проводилось численным методом с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit. Учитывались возмущения от больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и влияние эффекта Ярковского. При учете эффекта Ярковского использовались оценки максимальной скорости дрейфа большой полуоси  $|da/dt|_{max}$ , полученные в [10] с использованием метода нормализации на основе параметров астероида (101955) Веппи [13, 14]. Для оценки скорости дрейфа большой полуоси необходимо знать наклон оси вращения астероида к плоскости его орбиты  $\phi$ . Поскольку для исследуемых астероидов таких данных нет, мы получаем оценки возраста для нескольких фиксированных значений наклона каждого астероида:  $da/dt = 0$  при  $\phi = 90^\circ$  или  $270^\circ$ ,  $\pm 1/2 |da/dt|_{max}$  при  $\phi = 60^\circ$  и  $240^\circ$  и  $\pm |da/dt|_{max}$  при  $\phi = 0^\circ$  и  $180^\circ$ . Затем рассматриваем разные комбинации этих наклонов и получаем свою оценку для каждой комбинации. На наш взгляд, это более информативный метод оценки, чем примененный в [15], где скорости дрейфа случайным образом варьировались вместе с элементами орбит. В нашем случае для данной пары наклонов осей вращения астероидов получается более точная оценка возраста. Появляется возможность исследовать зависимость оценок возраста от используемых наклонов во всем диапазоне их изменения и получить экстремальные оценки возраста. Интервал интегрирования выбран на основе оценок, полученных в [10], и составил 10 тыс. лет.

При оценке возраста молодых пар астероидов анализировались условия наступления низкоскоростных сближений астероидов между собой [5]:  $\Delta r < 10R_{Hill}$ ,  $v_{rel} < 5V_{esc}$ , где  $\Delta r$  — относительное расстояние между астероидами;  $R_{Hill}$  — радиус сферы Хилла более массивного астероида;  $v_{rel}$  — относительная скорость астероидов;  $V_{esc}$  — вторая космическая скорость относительно более массивного астероида. Использовались оценки радиусов сфер Хилла  $R_{Hill}$  астероидов, полученные в [10]. Вторые космические скорости вычислялись для астероидоцентрических расстояний, соответствующих относительному расстоянию между астероидами во время сближения.

## Результаты исследования вероятностной эволюции

К настоящему времени получены первые результаты исследования вероятностной эволюции пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49. Рассмотрены три варианта, различающиеся скоростью дрейфа большой полуоси орбиты  $da/dt$  астероида (87887) 2000 SS286:

$(da/dt)_{87887}$ , а. е./млн лет	$(da/dt)_{415992}$ , а. е./млн лет	$t_r$ , годы	$t_\varrho$ , годы	Варианты с низкоскоростными сближениями
$1.1 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-8176 \pm 41$	$-8360 \pm 110$	74 %
$5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-8064 \pm 40$	$-8260 \pm 130$	74 %
$-5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-7850 \pm 38$	$-8030 \pm 130$	68 %

1)  $5.5 \cdot 10^{-5}$  а. е./млн лет; 2)  $1.1 \cdot 10^{-4}$  а. е./млн лет; 3)  $-5.5 \cdot 10^{-5}$  а. е./млн лет. Скорость дрейфа большой полуоси орбиты астероида (415992) 2002 AT49 полагалась равной  $da/dt = 9.5 \cdot 10^{-5}$  а. е./млн лет. Для каждого астероида было промоделировано 1000 клонов орбит. Для каждого варианта рассматривалось  $10^6$  вариантов эволюции пары. В таблице приведены оценки возраста  $t_r$  и  $t_\varrho$ , соответствующие минимальным расстояниям между астероидами  $\Delta r$  и минимальным значениям метрики  $\varrho_2$ . В последнем столбце таблицы дано количество вариантов, в которых  $\Delta r < 10R_{Hill}$ ,  $v_{rel} < 5V_{esc}$ .

## Обсуждение результатов и заключение

Полученные результаты показывают, что оценки возраста  $t_r$  и  $t_\varrho$  хотя и близки между собой, различаются существенно. Одна из причин — дискретность выдачи результатов интегрирования. В данном случае интервал времени между соседними точками составлял 0.1 года. Дополнительное интегрирование на этом интервале с более мелким шагом позволит получить более точные оценки минимальных расстояний  $\Delta r$  и увеличить количество вариантов, соответствующих условию низкоскоростных сближений.

Оценки возраста  $t_r$  и  $t_\varrho$  различаются между собой для данных вариантов примерно на 200 лет. Это связано с тем, что близость орбит не гарантирует сближения астероидов. Наиболее тесные сближения астероидов происходят, когда расстояние между орбитами (метрика  $\varrho_2$ ) вблизи минимального значения, но не обязательно совпадает с ним.

Количество вариантов, соответствующих низкоскоростным сближениям, составляет от 68 до 74 %. На основании этого можно сделать вывод, что оценки времени  $t_r$  и  $t_\varrho$ , соответствующие минимальным расстояниям между астероидами  $\Delta r$  и минимальным значениям метрики  $\varrho_2$ , можно использовать в качестве оценок возраста пары.

Рассмотренные варианты дают оценку возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 от 7.8 до 8.2 тыс. лет, что близко к оценке  $7.4 \pm 0.3$  тыс. лет, полученной в работе [15]. Различия оценок связаны с отличиями в используемых наборах элементов орбит (разные начальные эпохи), интеграторах (Orbit9 и swift), применяемых моделях сил (в работе [15] учитывается влияние карликовой планеты Церера и массивных астероидов Паллада и Веста).

Для получения более точных оценок возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 необходимо выполнить моделирование для полного набора вариантов, различающихся скоростями дрейфа большой полуоси. Существенно повысить точность оценки возраста пары можно после получения оценки скоростей дрейфа больших полуосей орбит по результатам наблюдений. На оценку возраста пары также может влиять механизм образования пары, но это требует дополнительного исследования.

Полученные результаты показывают, что представленный метод оценки возраста молодой пары астероидов может быть успешно применен для решения данной задачи.

## Библиографические ссылки

- [1] *Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D. et al.* Formation of asteroid pairs by rotational fission // *Nature*. — 2010. — Vol. 466, № 7310. — P. 1085–1088. 1009.2770.
- [2] *Jacobson S. A., Scheeres D. J.* Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems // *Icarus*. — 2011. — Vol. 214, № 1. — P. 161–178. 1404.0801.
- [3] *Vokrouhlický D., Pravec P., Durech J. et al.* The young Datura asteroid family. Spins, shapes, and population estimate // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. A91.
- [4] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus*. — 2018. — Vol. 304. — P. 110–126.
- [5] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid pairs: A complex picture // *Icarus*. — 2019. — Vol. 333. — P. 429–463. 1901.05492.
- [6] *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [7] *Kholshevnikov K. V., Shechepalova A. S., Jazmati M. S.* On a quotient space of keplerian orbits // *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*. — 2020. — Vol. 53, № 1. — P. 108–114.
- [8] *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. Space Sci.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
- [9] *Kuznetsov E. D., Vasileva M. A.* On New Members of Asteroid Clusters Similar to Asteroid Pairs // 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society. — 2019. — Vol. 82. — P. 6192.
- [10] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E. et al.* A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // *Solar System Research*. — 2020. — Vol. 54, № 3. — P. 236–252.
- [11] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E., Safronova V. S.* Age estimation of asteroid pair with close orbits (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 // *INASAN Science Reports*. — 2020. — Vol. 5. — P. 52–55.
- [12] *Пригарин С. М.* Численное моделирование многомерных гауссовских распределений. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2018.
- [13] *Spoto F., Milani A., Knežević Z.* Asteroid family ages // *Icarus*. — 2015. — Vol. 257. — P. 275–289.
- [14] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61. 1805.05947.
- [15] *Žižka J., Galád A., Vokrouhlický D. et al.* Asteroids 87887 — 415992: the youngest known asteroid pair? // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A20.