

УДК 523.44

ОЦЕНКА ВОЗРАСТА МОЛОДЫХ ПАР АСТЕРОИДОВ

© 2024 г. В. С. Сафронова^{а,*}, Э. Д. Кузнецов^{а,**}

^аУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

E-mail: *v.s.safronova@urfu.ru; **eduard.kuznetsov@urfu.ru

Поступила в редакцию 04.01.2024 г.

После доработки 04.02.2024 г.

Принята к публикации 07.03.2024 г.

В работе с целью оценки возраста исследована вероятностная эволюция трех молодых пар астероидов на близких орбитах: (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16, (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39. При численном моделировании наряду с гравитационными возмущениями учитывался эффект Ярковского в форме векового дрейфа большой полуоси орбиты. Для каждой пары астероидов рассматривались 25 сценариев эволюции, соответствующих разным комбинациям наклонов осей вращения астероидов и соответственно различным скоростям дрейфа больших полуосей за счет эффекта Ярковского. Для каждого астероида генерировалась 1000 клонов. Оценки возраста получены на основе анализа распределений моментов: 1) низкоскоростных сближений астероидов пары до расстояний порядка сферы Хилла при относительной скорости в несколько единиц второй космической скорости и 2) достижения минимальных значений метрики Холшевникова, характеризующей расстояние между орбитами. Получены следующие оценки возраста молодых пар астероидов: (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 – от 7.58 ± 0.04 до 8.80 ± 0.04 тыс. лет; (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 – от 15.5 ± 1.0 до 58.6 ± 16.0 тыс. лет; (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 – от 32.3 ± 0.1 до 102.6 ± 0.7 тыс. лет.

Ключевые слова: пары астероидов, численное моделирование, метрики Холшевникова, эффект Ярковского, вероятностная эволюция, радиус сферы Хилла, вторая космическая скорость

DOI: 10.31857/S0320930X24060102, EDN: NHANXS

ВВЕДЕНИЕ

Малые тела распределены в Солнечной системе неравномерно. Главный пояс астероидов имеет сложную динамическую структуру. Существование пар астероидов на близких орбитах было показано в работе (Vokrouhlický, Nesvorný, 2008). 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: распад быстро вращающегося родительского тела (Pravec и др., 2010), вторичное деление образующихся при распаде тел (Jacobson, Scheeres, 2011), кратерообразующее

столкновение с почти критически вращающимся родительским астероидом (Vokrouhlický и др., 2017), каскадное разрушение родительского тела группы или семейства (Pravec и др., 2018). Современное состояние проблемы изучения молодых пар астероидов представлено в работе (Pravec и др., 2019). Фотометрические данные в целом подтверждают механизм образования пар, предложенный в (Pravec и др., 2010).

В работе (Кузнецов и др., 2020а) был выполнен поиск молодых пар астероидов на близких орбитах на основе исследования эволюции номинальных орбит астероидов. В отличие от традиционно используемых квазиметрик (см., например, Vokrouhlický, Nesvorný, 2008; Pravec и др., 2019), близость кеплеровых орбит оценивалась с использованием метрик Холшевникова

ρ_2 и ρ_5 (Kholshchevnikov и др., 2016; Холшевников, Щепалова, 2018; Kholshchevnikov и др., 2020). В работе (Kholshchevnikov и др., 2016) определены пять метрик ρ_i , $i = 1, \dots, 5$. Метрики ρ_1 и ρ_2 определяют расстояние в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит: большой полуоси a , эксцентриситета e , наклона i , долготы восходящего узла Ω и аргумента перигелия ω . Метрика ρ_1 зависит от неопределенного параметра L , что затрудняет ее использование. У метрики ρ_2 параметр L , имеющий размерность длины, является масштабным множителем, который не играет никакой роли при сравнении расстояний в любом естественном семействе орбит, в отличие от метрики ρ_1 . В Солнечной системе масштабный фактор может быть положен равным $L = 1$ а. е. Метрики ρ_3 , ρ_4 и ρ_5 определены в фактор-пространствах. Метрика ρ_3 определяется как минимальное значение метрики ρ_2 при всех возможных значениях долгот восходящих узлов орбит. Метрика ρ_4 определяется как минимальное значение метрики ρ_2 при всех возможных значениях аргументов перигелия орбит. Метрика ρ_5 определяется как минимальное значение метрики ρ_2 при всех возможных значениях долгот восходящих узлов и аргументов перигелия, т.е. определяет расстояние в трехмерном фактор-пространстве позиционных элементов a , e , i . Метрика ρ_2 дает оценку расстояния между орбитами в современную эпоху с учетом ориентации линий узлов и аписид каждой из орбит. Метрика ρ_5 получается из метрики ρ_2 при совпадении линий аписид и равенстве нулю аргументов перигелия. Близость метрик ρ_2 и ρ_5 указывает на то, что орбиты близки по своим размерам, форме, а также имеют близкую ориентацию в пространстве. Это может свидетельствовать о молодости пары – после образования пары узлы и перигелии орбит еще не успели разойтись, следовательно, возраст пары не превышает 1–2 млн лет. Условие близости значений метрик ρ_2 и ρ_5 можно рассматривать как необходимое условие молодости пары.

В работе (Кузнецов и др., 2020а) было выделено 13 кандидатов в молодые пары астероидов на близких орбитах. На основе номинальных орбит получены оценки возраста для семи пар астероидов, из них для трех пар для ряда комбинаций скоростей дрейфа большой полуоси орбит астероидов выполняются условия низкоскоростных сближений. Использовался модифицированный вариант критерия, предложенного в работе (Pravec и др., 2019):

$$\Delta r_{\min} < 10 \times R_H, \quad \Delta v < 4 \times V_2, \quad (1)$$

где Δr_{\min} – минимальное расстояние между астероидами, R_H – радиус сферы Хилла, Δv – относительная скорость астероидов на расстоянии Δr_{\min} , V_2 – вторая космическая скорость относительно более массивного астероида на расстоянии Δr_{\min} (в работе (Pravec и др., 2019) используется значение второй космической скорости на поверхности астероида). Для пар (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 и (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 реализуются варианты с комбинациями скорости дрейфа большой полуоси, когда выполняются условия: $\Delta r_{\min} < 2 \times R_H$ и $\Delta v < 2 \times V_2$. Для пары (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39 реализуются варианты, для которых $\Delta r_{\min} < 4 \times R_H$ и $\Delta v < 5 \times V_2$.

Второе условие удовлетворяет соответствующему условию, предложенному в работе (Pravec и др., 2019), в силу различных определений V_2 в работах (Pravec и др., 2019) и (Кузнецов и др., 2020а). Основываясь на этих результатах, в настоящей работе мы выполним исследование вероятностной эволюции и получим уточненные оценки возраста для трех молодых пар: (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16, (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39.

Оценки возраста, полученные в (Кузнецов и др., 2020а), основаны на анализе эволюции номинальных орбит:

- от 5.6 до 5.75 тыс. лет для пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49,
- от 13.5 до 23.7 тыс. лет для (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16,
- от 29 до 68 тыс. лет для (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39.

Результаты, полученные на основе исследования вероятностной эволюции:

- 7.4 ± 0.3 тыс. лет для (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 (Žižka и др., 2016),
- более 10 тыс. лет для (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 (Žižka и др., 2016),
- 10–140 тыс. лет при наиболее вероятном значении 31 тыс. лет (Pravec и др., 2019), не превышает 150 тыс. лет и, вероятно, составляет от 37 до 68 тыс. лет (Кузнецов и др., 2020б) для (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39.

Отметим, что оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, полученные в работах (Žižka и др., 2016) и (Кузнецов и др., 2020а), существенно различаются. Кроме того,

в работах (Žižka и др., 2016) и (Pravec и др., 2019) скорость дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленная эффектом Ярковского, является варьируемым совместно с элементами орбиты параметром, что ведет к усреднению влияния эффекта Ярковского на получаемые оценки. В данной работе при исследовании вероятностной эволюции будут рассматриваться отдельные сценарии для различных значений скорости дрейфа, что позволит исключить комбинации скоростей дрейфа, которые не приводят к сближению орбит в прошлом, а также получить более точные оценки возраста пар для конкретных рассматриваемых сценариев.

В настоящей работе мы сначала охарактеризуем исследуемые пары, затем опишем методы, используемые для оценки возраста пар, приведем результаты исследования вероятностной эволюции и выполним анализ получаемых оценок возрастов пар.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ: (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16, (21436) CHAORYICHI – (334916) 2003 YK39

Абсолютные звездные величины астероидов H и их элементы орбит были взяты из каталога Asteroids – Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>) на эпоху MJD 58800 (00^h00^m00^s 13.11.2019) (см. табл. 1). На основе элементов орбит были вычислены метрики Холшевникова ρ_2 и ρ_5 для оценки расстояний между орбитами рассматриваемых пар астероидов. Разность

метрик $\rho_2 - \rho_5$ позволяет проверить необходимое условие молодости пар астероидов. В табл. 2 для исследуемых пар астероидов даны значения метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 , а также их разности $\rho_2 - \rho_5$. Приведенные значения метрик удовлетворяют критериям отбора молодых пар астероидов: $\rho_2 < 0.001$ (а. е.)^{1/2}, $\rho_5 < 0.001$ (а. е.)^{1/2} и $\rho_2 - \rho_5 < 0.0001$ (а. е.)^{1/2}. Значение критерия 0.001 (а. е.)^{1/2} для метрик ρ_2 и ρ_5 было выбрано по аналогии с работой (Холшевников, Щепалова, 2018), в которой данный критерий использовался при анализе близости орбит астероидов. Отметим, что квадрат значения критерия равен 150 км и не превышает размера радиуса сферы Хилла для астероидов диаметром более 1 км (см., например, Кузнецов и др., 2020а). Значение критерия для разности метрик $\rho_2 - \rho_5$ выбрано на порядок меньше критериев для самих метрик, что обеспечивает не только малость, но и близость значений метрик ρ_2 и ρ_5 . Квадрат разности метрик $(\rho_2 - \rho_5)^2$ равен 1.5 км.

При учете влияния эффекта Ярковского будут использоваться оценки модулей максимальных значений скорости дрейфа больших полуосей $|da/dt|_{\max}$. В табл. 3 приведены значения альбедо p_v , плотности ρ , диаметров D астероидов и соответствующие им оценки модулей максимальных значений скорости дрейфа больших полуосей $|da/dt|_{\max}$, полученные в работе (Кузнецов и др., 2020а).

При анализе низкоскоростных сближений астероидов пары будут использоваться оценки радиуса сферы Хилла R_H более массивного астероида пары, полученные в (Кузнецов и др., 2020а) (см. табл. 4). В табл. 4 более массивный астероид пары выделен полужирным шрифтом.

Таблица 1. Абсолютные звездные величины H и элементы орбит астероидов на эпоху MJD 58800

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , угл. град	ω , угл. град	Ω , угл. град
(87887) 2000 SS286	15.21	2.75416	0.15064	8.35791	299.168	163.519
(415992) 2002 AT49	16.43	2.75413	0.15166	8.35895	299.179	163.635
(320025) 2007 DT76	16.10	2.84061	0.10374	14.2080	345.760	118.388
(489464) 2007 DP16	17.23	2.84057	0.10359	14.2091	345.763	118.457
(21436) Chaoyichi	15.30	2.18663	0.08548	3.73630	320.310	178.179
(334916) 2003 YK39	18.09	2.18667	0.08544	3.73625	320.309	178.144

Таблица 2. Значения метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 для пар астероидов на эпоху MJD 58800

Астероид 1	Астероид 2	$\rho_2 \times 10^4$, (а. е.) ^{1/2}	$\rho_5 \times 10^4$, (а. е.) ^{1/2}	$(\rho_2 - \rho_5) \times 10^4$, (а. е.) ^{1/2}
(87887) 2000 SS286	(415992) 2002 AT49	2.013	1.700	0.313
(320025) 2007 DT76	(489464) 2007 DP16	3.345	2.553	0.792
(21436) Chaoyichi	(334916) 2003 YK39	1.069	0.709	0.360

Таблица 3. Значения альбедо p_v , плотности ρ , диаметров D астероидов и оценки модулей максимальных значений скорости дрейфа больших полуосей $|da/dt|_{\max}$ (Кузнецов и др., 2020а)

Астероид	p_v	ρ , г/см ³	D , км	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, (а. е.)/(млн лет)
(87887) 2000 SS286	0.2 ¹⁾	2.72 ²⁾	2.43 ¹⁾	1.1
(415992) 2002 AT49	0.2 ¹⁾	2.72 ²⁾	1.36 ¹⁾	1.9
(320025) 2007 DT76	0.057 ³⁾	1.33 ³⁾	3.35 ³⁾	1.6
(489464) 2007 DP16	0.057 ³⁾	1.33 ³⁾	1.93 ³⁾	3.2
(21436) Chaoyichi	0.222 ⁴⁾	2.72 ²⁾	1.953 ⁴⁾	1.4
(334916) 2003 YK39	0.24 ²⁾	2.72 ²⁾	0.62 ⁵⁾	4.5

Примечания: ¹⁾ (Žižka и др., 2016).
²⁾ Значение соответствует таксономическому классу S (Warner и др., 2009).
³⁾ Значение соответствует таксономическому классу C (Warner и др., 2009).
⁴⁾ (Mainzer и др., 2016).
⁵⁾ Оценка диаметра получена по формуле $D = 1329 \text{ км} \times 10^{-H/5} \times \frac{1}{\sqrt{p_v}}$ (Bowell и др., 1989).

Таблица 4. Оценки радиуса сферы Хилла R_H более массивного астероида пары (выделен полужирным шрифтом) (Кузнецов и др., 2020а)

Пара астероидов	R_H , км
(87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49	621
(320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16	696
(21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39	396

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА
ПАР АСТЕРОИДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЕРОЯТНОСТНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

*Моделирование вероятностной
эволюции астероидов*

Для исследования вероятностной эволюции для каждого астероида генерируется 1000 клонов орбит на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений (см., например, Пригарин, 2018). 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 орбиты ε_{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. В результате для каждого астероида выполняется моделирование динамической

эволюции 1000 клонов орбит, а для каждой пары рассматривается 10^6 вариантов эволюции.

Моделирование динамической эволюции астероидов и их клонов проводится численным методом с помощью программы Orbit9 (<http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>), входящей в программный комплекс OrbFit (Orbfit Consortium, 2011). Учитываются возмущения от больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и влияние эффекта Ярковского.

В программе Orbit9 влияния эффекта Ярковского учитывается в виде векового дрейфа большой полуоси da/dt . При использовании данного метода необходимо знать наклон оси вращения астероида к плоскости его орбиты ϕ . Поскольку для исследуемых астероидов таких данных нет, для каждого астероида рассматриваются пять вариантов положения оси вращения и, соответственно, скорости дрейфа: $da/dt = 0$ при $\phi = 90^\circ$ или 270° ; $da/dt = \pm 1/2 |da/dt|_{\max}$ при $\phi = 60^\circ$ и 240° соответственно; $da/dt = \pm |da/dt|_{\max}$ при $\phi = 0^\circ$ и 180° соответственно. Для рассматриваемых астероидов и оценки максимальной скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{\max}$ были получены в работе (Кузнецов и др., 2020а) и приведены в табл. 3. В результате для каждой пары рассматриваются 25 сценариев эволюции, соответствующих различным комбинациям наклонов осей вращения и, соответственно, скоростей дрейфа больших полуосей орбит. Для каждого сценария будет получена своя оценка возраста пары астероидов.

Интервал интегрирования для каждой пары выбирается на основе оценок возраста, полученных на основе анализа динамической эволюции

номинальных орбит (Кузнецов и др., 2020a). В работе (Кузнецов и др., 2020a) оценка возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 составила от 5.6 до 5.75 тыс. лет, поэтому для исследования вероятностной эволюции был выбран интервал 10 тыс. лет. При исследовании динамической эволюции пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 в работе (Кузнецов и др., 2020a) была получена оценка возраста от 13.46 до 23.67 тыс. лет, поэтому для исследования вероятностной эволюции был выбран интервал 30 тыс. лет. Дополнительно для пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 проведено интегрирование на интервалах 40, 50 и 100 тыс. лет, так как на интервале 30 тыс. лет не для всех сценариев эволюции были найдены низкоскоростные сближения. В работе (Кузнецов и др., 2020a) по результатам моделирования в программе Orbit9 оценка возраста пары (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39 составила от 29 до 68 тыс. лет. Вероятностная эволюция исследовалась на интервалах 100 и 200 тыс. лет, поскольку для некоторых сценариев интервал 100 тыс. лет оказался слишком коротким. Шаг выдачи результатов выбирался исходя из интервала интегрирования и фиксированного числа шагов, равного 10^5 .

Оценка возраста пары на основе анализа низкоскоростных сближений

В момент образования пары астероидов должны выполняться условия низкоскоростного сближения, согласно которым расстояние между астероидами имеет тот же порядок, что и радиус сферы Хилла R_H , относительная скорость Δv имеет значение, сравнимое со второй космической скоростью V_2 . Один из вариантов критерия низкоскоростного сближения (1) предложен в работе (Pravec и др., 2019). Следуя работе (Кузнецов и др., 2020a), мы модифицируем второе условие этого критерия и рассматриваем вторую космическую скорость V_2 относительно более массивного астероида на астероидоцентрическом расстоянии Δr , равном расстоянию между центрами масс астероидов:

$$V_2 = \left(\frac{\pi G \rho D^3}{3 \Delta r} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где G – гравитационная постоянная. Значения плотности ρ и диаметров D рассматриваемых астероидов даны в табл. 3. Мы используем оценки радиусов сфер Хилла R_H для более массивного астероида пары, определенные в (Кузнецов и др., 2020a) и приведенные в табл. 4.

Для каждого сценария эволюции в каждом из 10^6 вариантов будет выполняться поиск минимального расстояния между клонами астероидов Δr_{\min} и соответствующей этому расстоянию относительной скорости клонов астероидов Δv . Это позволит выбрать комбинации наклонов осей вращения астероидов (и соответственно, скоростей дрейфа больших полуосей), которые обеспечивают максимальное количество низкоскоростных сближений. Выразив минимальное расстояние Δr_{\min} в радиусах сферы Хилла R_H , а относительную скорость Δv в единицах второй космической скорости V_2 , запишем модифицированный критерий низкоскоростного сближения (1) в виде: $\Delta r_{\min} / R_H < 10$, $\Delta v / V_2 < 4$. Именно эти сценарии эволюции и будут использоваться для оценок возраста пар.

Оценка возраста пары астероидов на основе анализа значений метрик Холшевникова

Для каждого сценария эволюции в каждом из 10^6 вариантов будет выполняться поиск минимального значения метрики Холшевникова ρ_2 (Kholshchevnikov и др., 2016) и соответствующего ему момента времени t_p . В каждом сценарии распределение моментов t_p будет использоваться для оценки возраста пары. В момент формирования пары орбиты астероидов должны быть близки, следовательно, значение метрики ρ_2 должно быть малым.

Дополнительным условием при оценивании возраста пары будет близость оценок, получаемых разными методами: методом поиска моментов низкоскоростных сближений и методом поиска минимумов метрики ρ_2 . Изначально обе орбиты расположены близко одна к другой, а положения астероидов на орбитах должны обеспечивать условия низкоскоростного сближения. Таким образом, оба метода должны давать близкие, согласующиеся между собой оценки возраста пары астероидов.

ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ПАР

На основе анализа результатов вероятностной эволюции были получены оценки возраста трех молодых пар: (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 и (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39. В табл. 5–7 для каждой пары приведены оценки возраста для 25 рассмотренных сценариев. Для каждого астероида указаны пять вариантов скорости дрейфа большой полуоси da/dt . Для

каждого сценария эволюции приводятся три величины: оценки возраста t_r и t_p в годах от момента образования пары до эпохи MJD 58800, определенные методами поиска низкоскоростных сближений и минимальных значений метрики ρ_2 , соответственно, а также процент вариантов, для которых выполняются условия низкоскоростных сближений (1).

Оценка возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49

Оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, полученные по результатам анализа вероятностной эволюции, приведены в табл. 5. Максимальные значения модуля скорости дрейфа большой полуоси орбит астероидов (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 составляют, соответственно, 1.1×10^{-4} и 1.9×10^{-4} (а. е.)/(млн лет) (см. табл. 3). Как видно из табл. 5, оценки возраста по данным о низкоскоростных сближениях t_r для различных сценариев эволюции лежат в пределах от 7.58 ± 0.04 до 8.80 ± 0.04 тыс. лет. Максимальная оценка возраста t_r данной пары

составила 8.80 ± 0.04 тыс. лет при количестве вариантов с низкоскоростными сближениями 29%. Низкоскоростные сближения реализуются для всех 25 сценариев. Количество низкоскоростных сближений зависит от скорости дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного эффектом Ярковского, при этом количество вариантов с низкоскоростными сближениями среди всех сценариев не превышает 59%. Наибольшее количество низкоскоростных сближений, а именно 59%, зафиксировано в сценарии, когда значения скорости дрейфа большой полуоси орбит астероидов (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 равны -1.1×10^{-4} и -9.5×10^{-5} (а. е.)/(млн лет) соответственно. Для данного сценария оценка возраста t_r составляет 8.12 ± 0.04 тыс. лет.

Оценки возраста t_p на основе моментов достижения минимумов метрики Холшевникова ρ_2 лежат в диапазоне от 7.58 ± 0.19 до 8.77 ± 0.26 тыс. лет и согласуются в пределах ошибок с оценками возраста t_r , полученными на основе анализа низкоскоростных сближений. Средняя квадратическая погрешность определения возраста t_r не превышает 43 лет, а средняя квадратическая

Таблица 5. Оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 в годах

$\left(\frac{da}{dt}\right)_{87887},$ 10^{-4} (а. е.)/(млн лет)	$\left(\frac{da}{dt}\right)_{415992},$ 10^{-4} (а. е.)/(млн лет)				
	–1.9	–0.95	0	0.95	1.9
–1.1	$t_r = 8314 \pm 41$ $t_p = 8451 \pm 170$ 56%	8116 ± 40 8319 ± 100 59%	7927 ± 39 8088 ± 160 56%	7750 ± 37 7901 ± 160 52%	7583 ± 35 7577 ± 190 48%
–0.55	8432 ± 41 8594 ± 150 52%	8229 ± 41 8384 ± 150 58%	8035 ± 40 8220 ± 140 58%	7851 ± 38 8033 ± 130 55%	7678 ± 36 7749 ± 190 50%
0	8552 ± 41 8623 ± 200 45%	8345 ± 41 8491 ± 170 55%	8146 ± 40 8343 ± 100 58%	7956 ± 39 8115 ± 160 57%	7776 ± 37 7948 ± 140 53%
0.55	8675 ± 42 8637 ± 220 34%	8464 ± 41 8616 ± 160 51%	8260 ± 41 8403 ± 160 57%	8063 ± 39 8260 ± 130 58%	7878 ± 38 8051 ± 140 55%
1.1	8804 ± 43 8771 ± 260 29%	8584 ± 41 8625 ± 210 42%	8377 ± 41 8533 ± 170 54%	8176 ± 40 8360 ± 110 58%	7984 ± 39 8149 ± 160 57%

погрешность определения возраста t_p в несколько раз больше и достигает 260 лет. Для конкретных пар оценки возраста t_r и t_p различаются между собой не более чем на 200 лет.

Несовпадение оценок возраста, полученных на основе анализа распределения моментов низкоскоростных сближений и минимумов метрики Холшевникова ρ_2 , можно объяснить следующим образом. На рис. 1 и 2 показаны распределения минимальных расстояний Δr_{\min} и соответствующих им относительных скоростей Δv для астероидов пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49 при $(da/dt)_{87887} = -1.1 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{415992} = 1.9 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет). Моменты низкоскоростных сближений расположены на интервале от 7450 до 7750 лет в прошлое (время отсчитывается от момента MJD 58800). Для всех сближений минимальное расстояние Δr_{\min} , выраженное в радиусах сферы Хилла R_H , меньше 10 (см. рис. 1а). При этом процент вариантов, удовлетворяющих одновременно двум критерия низкоскоростных сближений $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$, равен 48% (см. табл. 1). Это объясняется тем, что не для всех сближений клонов выполняется условие $\Delta v < 4V_2$ (см. рис. 2). Таким образом, в данном сценарии реализуются варианты низкоскоростных сближений, для которых $\Delta r_{\min} < 7R_H$ (см. рис. 1б) и $\Delta v < 4V_2$.

На рис. 3 для этой же пары и того же сценария дано распределение минимумов метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ от времени. Минимальные

значения минимумов метрики концентрируются на интервале от 7700 до 8000 лет в прошлое. Такое несовпадение интервалов можно объяснить тесной близостью орбит астероидов данной пары. В этом случае низкоскоростные сближения астероидов могут происходить при любых реализуемых в данном сценарии расстояниях между орбитами. Для сравнения, значение радиуса сферы Хилла астероида (87887) 2000 SS286 (см. табл. 4) составляет $R_H = 621 \text{ км} = 0.0020 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, что на три порядка больше значений минимумов метрик на рис. 3, которые не превышают $6 \times 10^{-6} \text{ (а. е.)}^{1/2}$. В данном случае из-за тесной близости орбит метод поиска минимума метрики Холшевникова ρ_2 не может быть использован для оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49. Оценка возраста пары основывается на анализе низкоскоростных сближений и в зависимости от реализуемого сценария составляет от 7.58 ± 0.04 до 8.80 ± 0.04 тыс. лет. Полученные оценки возраста t_r зависят от разности скоростей дрейфа больших полуосей орбит астероидов $b = (da/dt)_{415992} - (da/dt)_{87887}$. Для данных, приведенных в табл. 5, зависимость можно аппроксимировать следующим выражением:

$$t_r = 4.170 + 3.975e^{512.821b}. \quad (3)$$

В формуле (3) скорости дрейфа большой полуоси и разность b измеряются в (а. е.)/(млн лет), возраст t_r измеряется в тыс. лет.

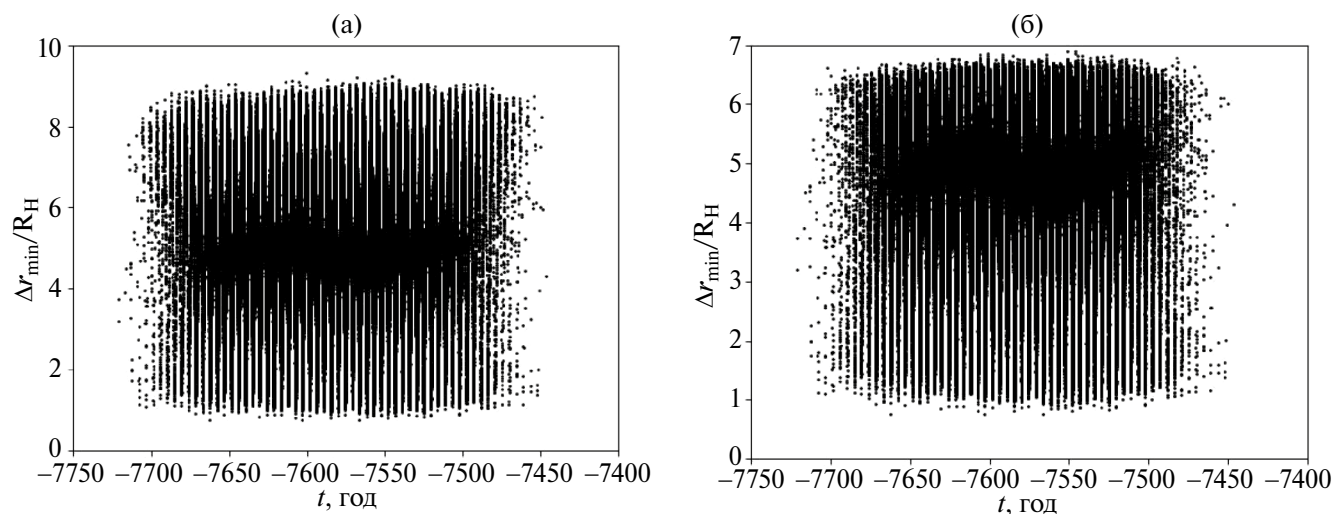


Рис. 1. Распределение минимальных расстояний Δr_{\min} , выраженных в радиусах сферы Хилла R_H , между клонами астероидов (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{87887} = -1.1 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{415992} = 1.9 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет): (а) – все возможные варианты сближений клонов астероидов; (б) – низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

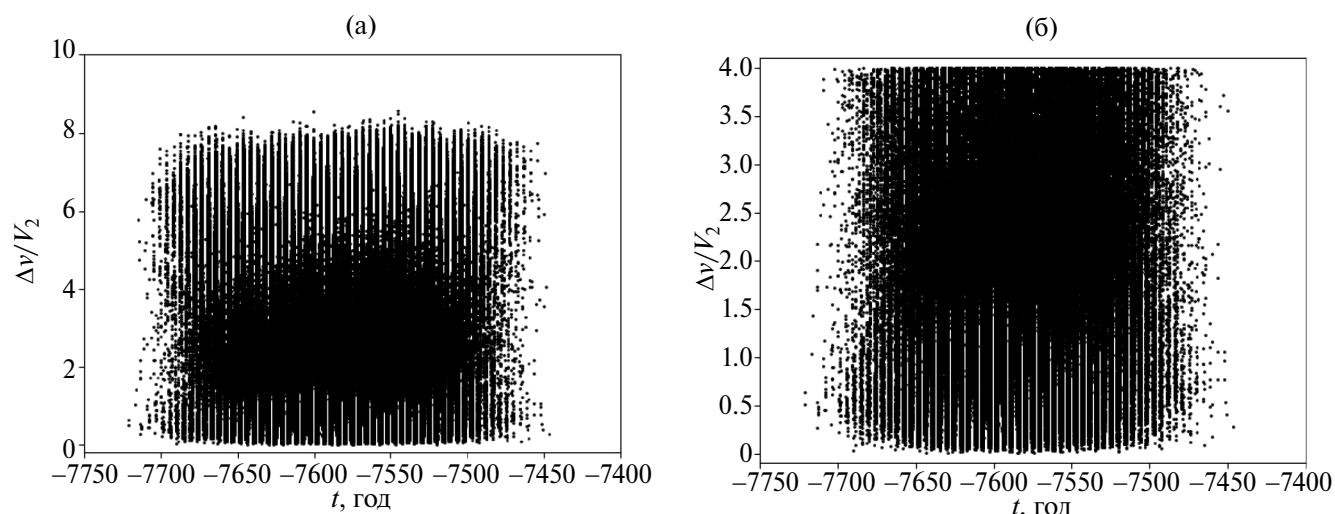


Рис. 2. Распределение относительной скорости Δv в единицах второй космической скорости V_2 в моменты сближений клонов астероидов (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{87887} = -1.1 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{415992} = 1.9 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет): (а) – все возможные сближения клонов астероидов; (б) – низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

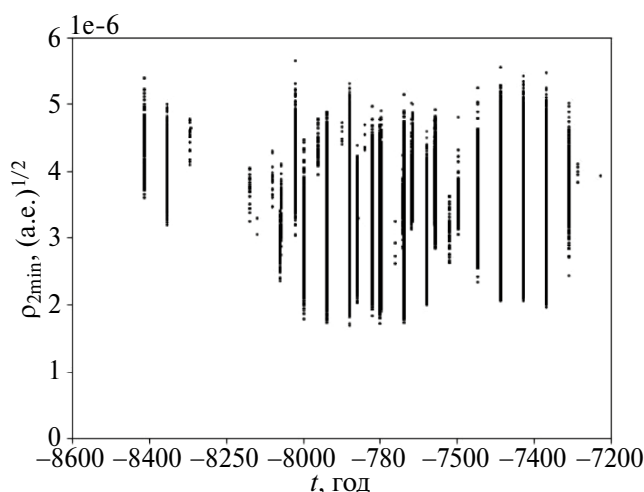


Рис. 3. Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ для пар клонов астероидов (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{87887} = -1.1 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{415992} = 1.9 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет).

ОЦЕНКА ВОЗРАСТА ПАРЫ (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16

Модуль максимального значения скорости дрейфа большой полуоси орбиты da/dt для астероидов (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 составляет 1.6×10^{-4} и 3.2×10^{-4} (а. е.)/(млн лет) соответственно (см. табл. 3). В табл. 6 приведены оценки возраста пары (320025) 2007 DT76 – (489464)

2007 DP16 в зависимости от значений скорости дрейфа больших полуосей орбит. Условие сближения орбит в прошлом реализуется при $b = (da/dt)_{489464} - (da/dt)_{320025} \leq 0$ (а. е.)/(млн лет). Для $b = -0.8$ (а. е.)/(млн лет) низкоскоростные сближения происходят в 47% случаев. Максимальное количество низкоскоростных сближений – 78%, достигается при $b = -3.2$ (а. е.)/(млн лет). Минимальное количество низкоскоростных сближений – 10%, реализуется при $b = 0$ (а. е.)/(млн лет). Поскольку оценки возраста t_r лежат в интервале от 15.5 ± 1.0 до 58.6 ± 16.0 тыс. лет, при уменьшении b интервал интегрирования постепенно увеличивался, чтобы охватить весь период динамической эволюции пары до момента ее образования. В случае положительных значений b , орбиты расходятся и сближения астероидов не фиксируются. Оценки возраста пары t_r по данным о низкоскоростных сближениях в зависимости от рассматриваемого сценария лежат в пределах от 15.5 ± 1.0 до 58.6 ± 16.0 тыс. лет. Для данных, приведенных в табл. 6, зависимость оценки возраста t_r от разности скоростей дрейфа больших полуосей орбит астероидов b можно аппроксимировать выражением

$$t_r = 12.154 + 23.273e^{-23481.509b} + 23.172e^{-4023.675b}. \quad (4)$$

В формуле (4) скорости дрейфа большой полуоси и разность b измеряются в (а. е.)/(млн лет), возраст t_r измеряется в тыс. лет.

Таблица 6. Оценки возраста пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 в тыс. лет

$\left(\frac{da}{dt}\right)_{320025}$, 10^{-4} (а.е.)/(млн лет)	$\left(\frac{da}{dt}\right)_{489464}$, 10^{-4} (а.е.)/(млн лет)				
	–3.2	–1.6	0	1.6	3.2
–1.6	$t_r = 24.9 \pm 2.6$ $t_p = 25.8 \pm 3.8$ 68%	58.6 ± 15.9 51.2 ± 24.6 10 %	–	–	–
–0.8	21.0 ± 1.8 21.0 ± 2.5 76%	32.5 ± 4.6 32.8 ± 6.4 47%	–	–	–
0	18.6 ± 1.4 18.3 ± 2.0 78%	24.9 ± 2.6 25.9 ± 4.1 67%	58.6 ± 16.0 51.5 ± 22.9 10 %	–	–
0.8	16.8 ± 1.1 16.4 ± 1.8 77%	21.0 ± 1.8 21.0 ± 2.5 76%	32.6 ± 4.6 32.7 ± 6.5 47%	–	–
1.6	15.5 ± 1.0 15.0 ± 1.4 74%	18.6 ± 1.4 18.3 ± 2.0 78%	24.9 ± 2.6 25.9 ± 4.0 67%	58.5 ± 15.9 54.1 ± 23.5 10 %	–

Оценки возраста t_r и t_p (см. табл. 6), полученные на основе анализа распределения моментов низкоскоростных сближений и минимумов метрики Холшевникова ρ_2 , согласуются между собой в пределах ошибок. Отметим, что разность между оценками возраста t_r и t_p растет

с уменьшением абсолютного значения b . На рис. 4 и 5 показаны распределения минимальных расстояний Δr_{\min} и соответствующих им относительных скоростей Δv для астероидов пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 при $(da/dt)_{320025} = -0.8 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет)

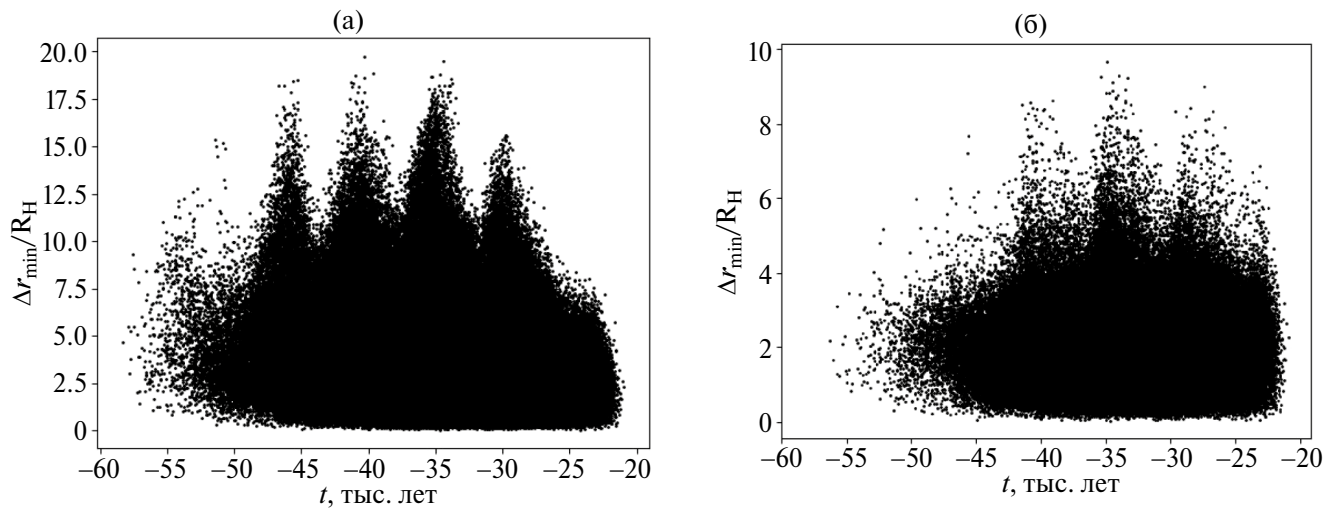


Рис. 4. Распределение минимальных расстояний Δr_{\min} , выраженных в радиусах сферы Хилла R_H , между клонами астероидов (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{320025} = -0.8 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{489464} = -1.6 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет): (а) – все возможные сближения клонов астероидов; (б) – низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

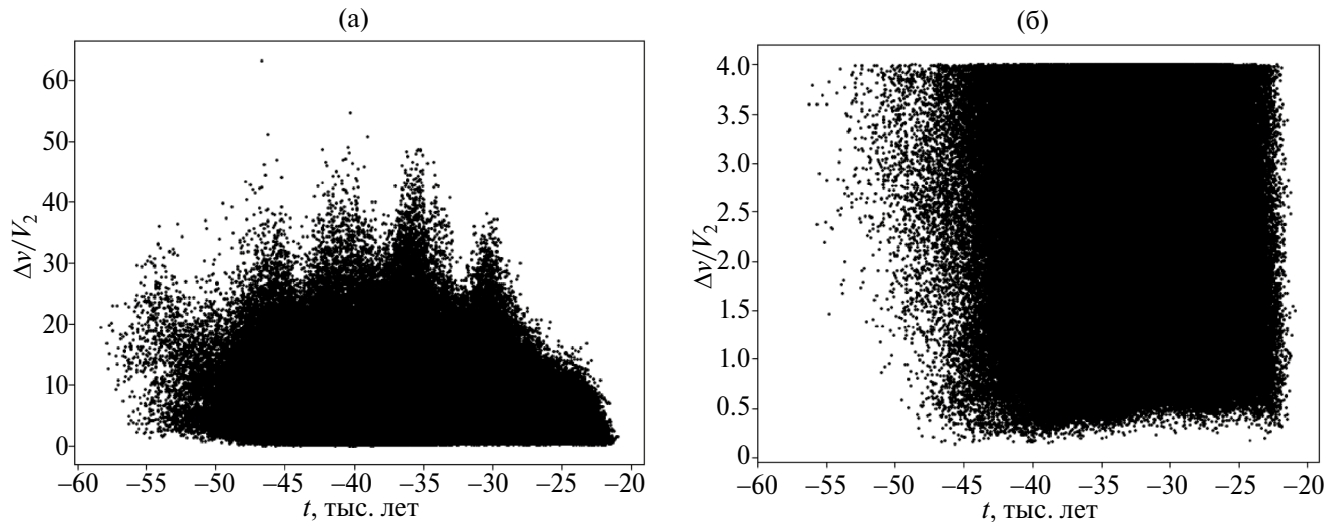


Рис. 5. Распределение относительной скорости Δv в единицах второй космической скорости V_2 в моменты сближений клонов астероидов (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{320025} = -0.8 \times 10^{-4}$ а.е./млн лет и $(da/dt)_{489464} = -1.6 \times 10^{-4}$ а.е./млн лет): (а) – все возможные сближения клонов астероидов; (б) – низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

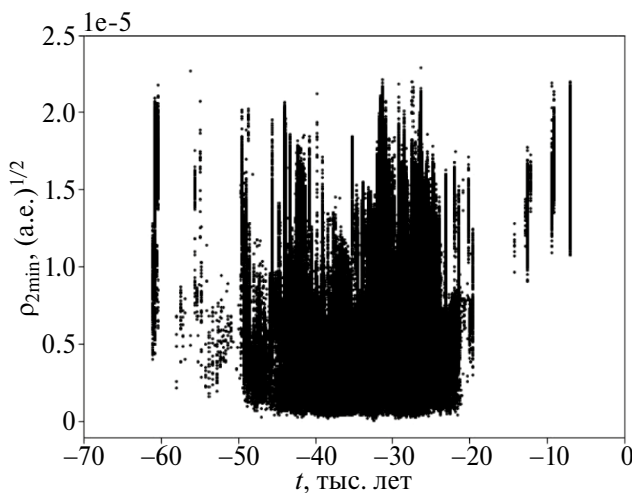


Рис. 6. Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ для пар клонов астероидов (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{320025} = -0.8 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{489464} = -1.6 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет).

и $(da/dt)_{489464} = -1.6 \times 10^{-4}$ (а.е.)/(млн лет). Моменты низкоскоростных сближений расположены на интервале от 22 до 57 тыс. лет в прошлое (время отсчитывается от момента MJD 58800). На рис. 6 для этой же пары и того же

сценария дано распределение минимумов метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ от времени. Минимальные значения минимумов метрики концентрируются на интервале от 20 до 50 тыс. лет в прошлое. Несмотря на тесную близость орбит астероидов пары, оценки с использованием минимальных значений метрики Холшевникова ρ_2 согласуются с результатами по данным о низкоскоростных сближениях астероидов. В данном случае значение радиуса сферы Хилла астероида (320025) 2007 DT76 (см. табл. 4) составляет $R_H = 696 \text{ км} = 0.0021 \text{ (а.е.)}^{1/2}$, что на два порядка больше значений минимумов метрик на рис. 6, которые не превышают $2.5 \times 10^{-5} \text{ (а.е.)}^{1/2}$. На основе распределения минимумов метрики Холшевникова ρ_2 оценки возраста пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 составляют от 15.0 ± 1.4 до 54.1 ± 23.5 тыс. лет в зависимости от рассматриваемого сценария.

Оценка возраста пары (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39

Для пары (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39 модуль максимального значения скорости дрейфа большой полуоси орбит da/dt астероидов составляет (см. табл. 7) 1.4×10^{-4} и 4.5×10^{-4} (а.е.)/(млн лет) соответственно. Оценка возраста пары, полученная по результатам исследования вероятностной эволюции на интервале 200 тыс.

лет, составляет от 32.3 ± 0.1 до 102.6 ± 0.7 тыс. лет. Оценки возраста получены только для 9 из 25 рассмотренных сценариев эволюции, для остальных сценариев низкоскоростные сближения не обнаружены. При этом доля вариантов с низкоскоростными сближениями составляет от 33% до 57%. Увеличение интервала интегрирования в прошлое не приведет к росту оценок возраста пары, так как примерно через 150–160 тыс. лет в прошлое от современной эпохи оба астероида испытывают тесные сближения с Марсом, после которых орбиты объектов перестают быть близкими. Полученные оценки возраста t_r зависят от разности скоростей дрейфа больших полуосей орбит астероидов $b = (da/dt)_{334916} - (da/dt)_{21436}$. Для данных, приведенных в табл. 7, зависимость можно аппроксимировать следующим выражением:

$$t_r = 29.396 + 175.326e^{6451.113b}. \quad (5)$$

В формуле (5) скорости дрейфа большой полуоси и разность b измеряются в (а. е.)/(млн лет), возраст t_r измеряется в тыс. лет.

Оценки возраста пары t_r и t_p (см. табл. 7), полученные на основе анализа распределения моментов низкоскоростных сближений и минимумов метрики Холшевникова ρ_2 , согласуются между собой в пределах ошибок. На рис. 7 и 8 показаны распределения минимальных расстояний Δr_{\min} и соответствующих им относительных скоростей Δv для астероидов пары (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 в зависимости от времени t при $(da/dt)_{21436} = 0.7 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{334916} = 2.25 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет). Моменты низкоскоростных сближений расположены на интервале от 92 до 97 тыс. лет в прошлое (время отсчитывается от момента MJD 58800) вблизи границы интервала интегрирования 100 тыс. лет. На рис. 9 для этой же пары и того же сценария дано распределение минимумов метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ от времени. Минимальные значения минимумов метрики концентрируются на интервале от 90 до 98 тыс. лет в прошлое. Несмотря на тесную близость орбит астероидов пары, оценки с использованием минимальных значений метрики Холшевникова ρ_2 согласуются

Таблица 7. Оценки возраста пары (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39 в тыс. лет

$\left(\frac{da}{dt}\right)_{21436}$, 10^{-4} (а. е.)/(млн лет)	$\left(\frac{da}{dt}\right)_{334916}$, 10^{-4} (а. е.)/(млн лет)				
	–4.5	–2.25	0	2.25	4.5
–1.4	–	–	-102.6 ± 0.7 -105.4 ± 4.2 33%	46.7 ± 0.2 47.9 ± 1.8 53%	32.3 ± 0.1 32.0 ± 2.3 40%
–0.7	–	–	–	55.3 ± 0.3 52.4 ± 0.7 55 %	35.5 ± 0.1 34.7 ± 0.8 43%
0	–	–	–	69.1 ± 0.4 72.4 ± 1.5 57%	39.7 ± 0.2 39.8 ± 1.4 47%
0.7	–	–	–	94.5 ± 0.8 93.6 ± 8.1 48%	45.2 ± 0.2 46.9 ± 1.7 52%
1.4	–	–	–	–	53.1 ± 0.2 51.5 ± 0.3 56 %

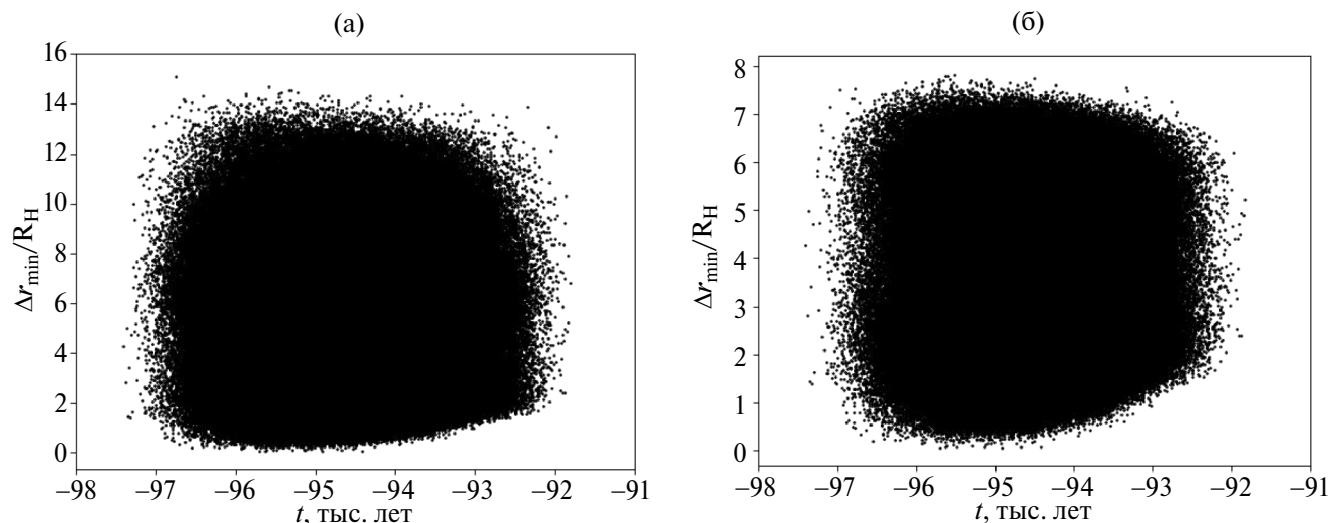


Рис. 7. Распределение минимальных расстояний Δr_{\min} , выраженных в радиусах сферы Хилла R_H , между клонами астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{21436} = 0.7 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{334916} = 2.25 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет): (а) — все возможные сближения клонов астероидов; (б) — низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

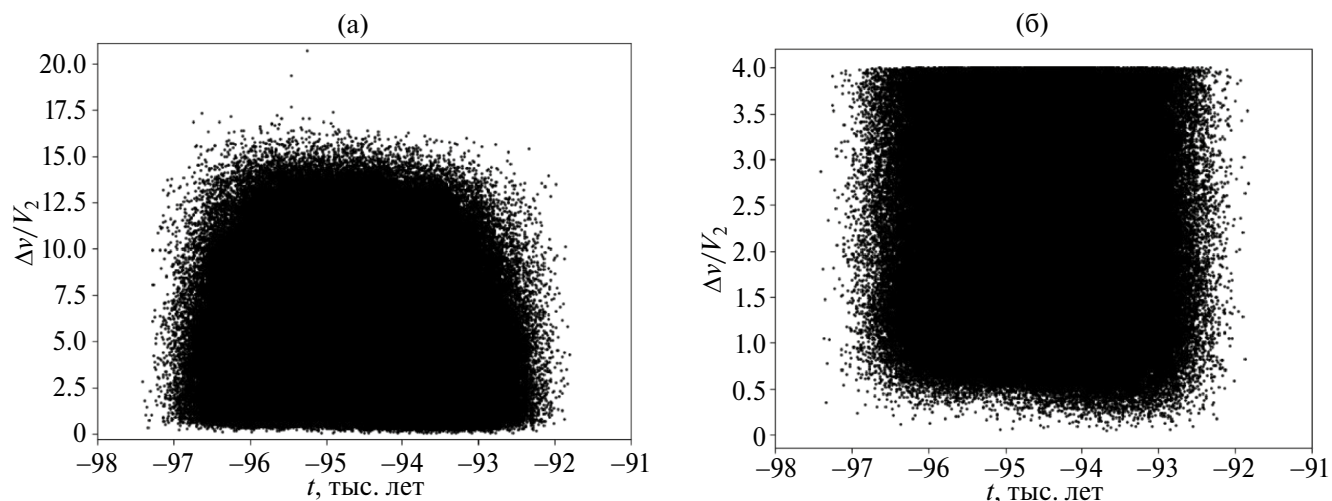


Рис. 8. Распределение относительной скорости Δv в единицах второй космической скорости V_2 в моменты сближений клонов астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{21436} = 0.7 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{334916} = 2.25 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет): (а) — все возможные сближения клонов астероидов; (б) — низкоскоростные сближения клонов, удовлетворяющие условиям $\Delta r_{\min} < 10R_H$, $\Delta v < 4V_2$.

с результатами по данным о низкоскоростных сближениях астероидов. В данном случае значение радиуса сферы Хилла астероида (21436) Chaoyichi (см. табл. 4) составляет $R_H = 396 \text{ км} = 0.0016 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, что на два порядка больше значений минимумов метрик на рис.

9, которые не превышают $7.0 \times 10^{-5} \text{ (а. е.)}^{1/2}$. На основе распределения минимумов метрики Холшевникова ρ_2 оценки возраста пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 составляют от 32.0 ± 2.3 до 105.4 ± 4.2 тыс. лет в зависимости от рассматриваемого сценария.

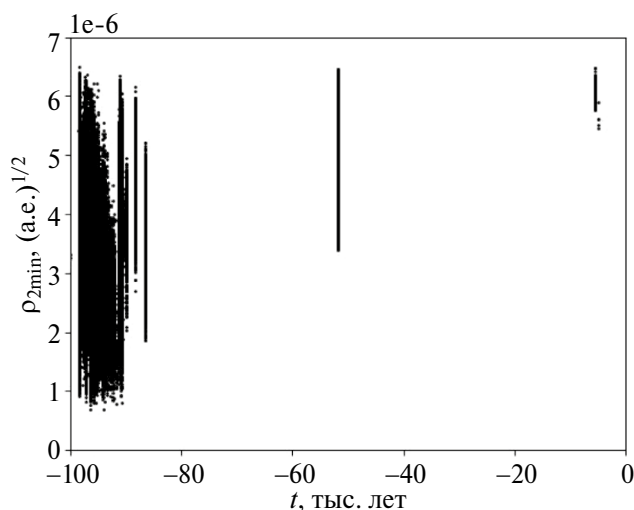


Рис. 9. Распределение минимальных значений метрики Холшевникова ρ_{2min} для пар клонов астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 в зависимости от времени t (отсчитывается от момента MJD 58800) при $(da/dt)_{21436} = 0.7 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет) и $(da/dt)_{334916} = 2.25 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые пары астероидов показывают различные примеры зависимости оценок возраста t_r и t_p от скорости дрейфа больших полуосей орбит. Орбиты астероидов пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 настолько близки между собой, что низкоскоростные сближения могут происходить при любых значениях метрики ρ_2 , а не только вблизи ее минимумов. Для данной пары оценки возраста в каждом сценарии получены на основе анализа низкоскоростных сближений. Пара (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 является одной из самых молодых среди известных пар астероидов. Ее возраст лежит в пределах от 7.58 ± 0.04 до 8.80 ± 0.04 тыс. лет. Минимальная оценка возраста 7.58 ± 0.04 тыс. лет пары близка к оценке 7.4 ± 0.3 тыс. лет, полученной в работе (Žižka и др., 2016). Полученная в работе (Кузнецов и др., 2020а) на основе анализа номинальных орбит оценка возраста пары от 5.6 до 5.75 тыс. лет является заниженной.

Для пар (320025) 2007 DT76 — (489464) 2007 DP16 и (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 оценки возраста, полученные на основе анализа низкоскоростных сближений t_r и распределения минимумов метрики Холшевникова $\rho_2 - t_p$, согласуются в пределах ошибок. Увеличение возраста пар требует увеличения интервала

интегрирования уравнений движения. Как следствие, для обеих пар появляются группы сценариев, в которых отсутствуют низкоскоростные сближения из-за расходимости орбит, обусловленной дрейфом больших полуосей орбит под влиянием эффекта Ярковского. Таким образом, предложенный метод рассмотрения отдельных сценариев эволюции в зависимости от комбинации скоростей дрейфа больших полуосей позволяет накладывать ограничения на динамические параметры астероидов в парах. Для пары (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 условие сближения орбит в прошлом реализуется при $b = (da/dt)_{489464} - (da/dt)_{320025} \leq 0$ (а. е.)/(млн лет). Для пары (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 это условие реализуется при $b = (da/dt)_{21436} - (da/dt)_{334916} \geq 1.4 \times 10^{-4}$ (а. е.)/(млн лет). Вблизи граничных значений b , соответствующих переходу от сближения к расхождению орбит в прошлом, возможны сценарии, показывающие большой возраст пары при малом количестве низкоскоростных сближений. Например, возможны такие сценарии для пары (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16, в которых количество низкоскоростных сближений составляет 10%. В этом случае при указании интервала оценок возраста пары следует приводить пороговое значение количества низкоскоростных сближений для учитываемых сценариев. В рассматриваемом случае пороговое значение равно 10%. При аппроксимации зависимости оценки возраста пары t_r от разности скоростей дрейфа b , для учета сценариев с большими оценками возраста вводится вторая экспонента (4), в отличие от случая, когда все сценарии показывают сближение орбит (3).

Для пары (320025) 2007 DT76 — (489464) 2007 DP16 оценки возраста пары t_r по данным о низкоскоростных сближениях при пороговом значении 10% в зависимости от рассматриваемого сценария лежат в пределах от 15.5 ± 1.0 до 58.6 ± 16.0 тыс. лет и не противоречат результатам работы (Žižka и др., 2016) — более 10 тыс. лет. Результаты исследования вероятностной эволюции позволили уточнить оценку (от 13.46 до 23.67 тыс. лет (Кузнецов и др., 2020а)), полученную на основе анализа динамической эволюции номинальных орбит.

Оценка возраста t_r при пороговом значении 33% для пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 составила от 32.3 ± 0.1 до 102.6 ± 0.7 тыс. лет. Полученная оценка показывает существенно большую нижнюю границу возраста пары по сравнению с результатами работы (Pravec и др., 2019) — 10–140 тыс. лет при наиболее

вероятном значении 31 тыс. лет. Полученная оценка нижней границы возраста пары более чем на 1 тыс. лет превышает наиболее вероятное значение возраста из работы (Pravec и др., 2019), а наиболее вероятные значения оценок лежат в интервале от 51 до 69 тыс. лет (см. табл. 7). В работе (Кузнецов и др., 2020а) были получены оценки возраста этой пары на основе номинальных орбит с помощью двух программ: 30–120 тыс. лет при использовании Mercury (Chambers, 1999) и 29–68 тыс. лет по результатам моделирования в Orbit9. Результаты настоящей работы позволили уточнить эти оценки.

Сопоставление оценок возраста t_r , получаемых на основе анализа низкоскоростных сближений астероидов, и t_p , соответствующих моментам максимального сближения орбит, показывают, что эти оценки согласуются в пределах ошибок. Различие получаемых оценок связано с тем, что орбиты астероидов очень близки и низкоскоростные сближения могут происходить даже, если расстояние между орбитами не является минимальным. Отметим, что оценки возраста t_p имеют большие ошибки, чем t_r . При медленном изменении близких орбит для разных пар клонов моменты t_p достижения минимальных значений метрики Холшевникова ρ_2 будут различаться сильнее, чем распределение моментов t_r низкоскоростных сближений, которое определяется быстрым движением тел по орбитам. В связи этим, в качестве основного метода оценки возраста молодых пар был выбран метод анализа низкоскоростных сближений. Метод поиска моментов сближений орбит использовался для контроля получаемых результатов и показал высокую надежность. Этот метод рекомендуется использовать при определении возраста пар в тех случаях, когда метод низкоскоростных сближений не применим.

Полученные результаты показывают, что представленный в данной работе метод оценки возраста молодых пар астероидов на основе анализа сценариев, соответствующих различным скоростям дрейфа больших полуосей орбит, обусловленного влиянием эффекта Ярковского, может быть успешно применен для решения данной задачи. Метод позволяет получать оценки возраста для каждого из сценариев, что дает возможность накладывать ограничения на скорости дрейфа большой полуоси, ведущие к сближениям астероидов и их орбит в прошлом. Метод позволяет аппроксимировать возраст системы t_r в зависимости от разности скоростей дрейфа больших полуосей астероидов b .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована вероятностная эволюция трех молодых пар астероидов: (87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49, (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16, (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39. Для каждой пары рассмотрены 25 сценариев, соответствующих различным значениям скорости дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного влиянием эффекта Ярковского. На основе этих результатов для каждого сценария получены оценки возраста пары с использованием двух методов: 1) анализа низкоскоростных сближений и 2) поиска моментов максимального сближения орбит на основе метрики Холшевникова ρ_2 . Оценки возраста пар, полученные разными методами, согласуются в пределах ошибок. Ошибки метода поиска моментов сближений орбит оказались больше, чем у метода поиска низкоскоростных сближений астероидов. В связи с этим метод поиска моментов сближений орбит использовался для контроля получаемых оценок возраста, в дальнейшем метод поиска сближений орбит рекомендовано использовать при определении возраста пар в тех случаях, когда метод низкоскоростных сближений не применим. В качестве основного метода оценки возраста молодых пар был выбран метод анализа низкоскоростных сближений. Получены следующие оценки возраста молодых пар астероидов: (87887) 2000 SS286 и (415992) 2002 AT49 – от 7.58 ± 0.04 до 8.80 ± 0.04 тыс. лет; (320025) 2007 DT76 и (489464) 2007 DP16 – от 15.5 ± 1.0 до 58.6 ± 16.0 тыс. лет; (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 – от 32.3 ± 0.1 до 102.6 ± 0.7 тыс. лет. Для каждой из пар получены зависимости (3)–(5) возраста системы t_r от разности скоростей дрейфа больших полуосей астероидов b .

Представленный в данной работе метод оценки возраста молодых пар астероидов на основе анализа сценариев, соответствующих различным скоростям дрейфа больших полуосей орбит, обусловленного влиянием эффекта Ярковского, показал свою работоспособность. Метод позволяет получать оценки возраста для каждого из сценариев, что дает возможность накладывать ограничения на скорости дрейфа большой полуоси, ведущие к сближениям астероидов и их орбит в прошлом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е., Сафронова В.С., Васильева М.А. Поиск молодых пар астероидов на близких орбитах // Астрон. вестн. 2020а. Т. 54. № 3. С. 260–277. (Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E., Safronova V.S., Vasileva M.A. A search for young asteroid pairs with close orbits // Sol. Syst. Res. 2020a. V. 54. № 3. P. 236–252.)
2. Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е., Сафронова В.С. Оценка возраста пары астероидов на близких орбитах (21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39 // Научн. Тр. ИНАСАН. 2020б. Т. 5. Вып. 2. С. 52–55.
3. Пригарин С.М. Численное моделирование многомерных гауссовских распределений // Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018.
4. Холшевников К.В., Шепалова А.С. О расстояниях между орбитами планет и астероидов // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5(63). Вып. 3. С. 509–523.
5. *Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A.W.* Application of photometric models to asteroids // Asteroids II. Proc. Conf., Tucson, AZ, Mar. 8–11, 1988 (A90-27001 10–91). Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 1989. P. 524–556.
6. *Chambers J.E.* A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1999. V. 304. P. 793–799.
7. *Jacobson S.A., Scheeres D.J.* Dynamics of rotationally fissioned asteroids: source of observed small asteroid systems // Icarus. 2011. V. 214. P. 161–178.
8. *Kholshchevnikov 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. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. 2275–2283.
9. *Kholshchevnikov K.V., Shepalova A.S., Jazmati M.S.* On a quotient space of Keplerian orbits // Vestn. St. Petersburg Univ.: Mathematics. 2020. V. 53. № 1. P. 108–114.
10. *Mainzer A.K., Bauer J.M., Cutri R.M., Grav T., Kramer E.A., Masiero J.R., Nugent C.R., Sonnett S.M., Stevenson R.A., Wright E.L.* NEOWISE Diameters and Albedos V1.0. EAR-A-COMPIL-5-NEOWISEDIA-M-V1.0. NASA Planetary Data System, 2016.
11. *Orbfit Consortium.* OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. Astrophysics Source Code Library. 2011. arXiv:1106.015.
12. *Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D., Scheeres D.J., Harris A.W., Galád A., Vaduvescu O., Pozo F., Barr A., Longa P., and 16 co-authors.* Formation of asteroid pairs by rotational fission // Nature. 2010. V. 466. P. 1085–1088.
13. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheeres D.J., Kušnirák P., Hornoch K., Galád A., Vrátil J., Pray D.P., Krugly Yu.N., and 19 co-authors.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // Icarus. 2018. V. 304. P. 110–126.
14. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheirich P., Ďurech J., Scheeres D.J., Kušnirák P., Hornoch K., Galad A., Pray D.P., and 40 co-authors.* Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. V. 333. P. 429–463.
15. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of asteroids probably of a common origin // Astron. J. 2008. V. 136. P. 280–290.
16. *Vokrouhlický D., Pravec P., Ďurech J., Bolin B., Jedicke R., Kušnirák P., Galád A., Hornoch K., Kryszczyńska A., Colas F., Moskovitz N., Thirouin A., Nesvorný D.* The young Datura asteroid family: Spins, shapes and population estimate // Astron. and Astrophys. 2017. V. 598. id. A91 (19 p.)
17. *Warner B.D., Harris A.W., Pravec P.* The asteroid lightcurve database // Icarus. 2009. V. 202. P. 134–146.
18. *Žižka J., Galád A., Vokrouhlický D., Pravec P., Kušnirák P., Hornoch K.* Asteroids 87887 – 415992: the youngest known asteroid pair? // Astron. and Astrophys. 2016. V. 595. id. A20.