

УДК 523.44

ПОИСК МОЛОДЫХ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

© 2020 г. Э. Д. Кузнецов^{a, *}, А. Е. Розаев^b, Е. Плавалова^c, В. С. Сафронова^a, М. А. Васильева^a

^aУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

^bЯрославский государственный университет, Ярославль, Россия

^cМатематический институт Словацкой академии наук, Братислава, Словакия

*e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru

Поступила в редакцию 02.09.2019 г.

После доработки 12.12.2019 г.

Принята к публикации 19.12.2019 г.

В работе выполнен анализ динамической эволюции ряда молодых пар астероидов на близких орбитах с целью оценки их возраста. Применено несколько методов отбора пар и оценки их возраста: анализ сходимости орбитальных элементов; оценка метрик Холшевникова в пространстве кеплеровых элементов орбит; оценка относительных расстояний и скоростей в моменты сближений астероидов. Получены оценки возраста пар астероидов в зависимости от скоростей дрейфа больших полуосей орбит, обусловленных влиянием эффекта Ярковского.

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

DOI: 10.31857/S0320930X2003007X

ВВЕДЕНИЕ

Распределение орбит астероидов в Солнечной системе является результатом различных процессов, которые действовали в течение продолжительного времени (см., например, Deienno и др., 2016; Granvik и др., 2017). Как было показано в работе (Vokrouhlický, Nesvorný, 2008), в главном поясе астероидов существует большое количество пар астероидов с близкими орбитами, имеющих общее происхождение. В результате исследования этих пар (Pravec, Vokrouhlický, 2009) была доказана их статистическая значимость. Численное интегрирование в прошлое показало, что в момент образования пары астероиды двигались с низкими относительными скоростями, но детальный механизм формирования пар астероидов на близких орбитах был еще не ясен.

Механизм формирования пар астероидов был предложен в работе (Pravec и др., 2010). При отношении масс астероидов меньше, чем $m_2/m_1 \approx 0.2$, возможно образование пары за счет распада быстро вращающегося родительского тела. Здесь m_1 — масса главного (более массивного) астероида пары, m_2 — масса второго астероида. Когда отношение масс приближается к этому верхнему пределу, период вращения родительского тела становится большим. Результаты фотометрических наблюдений пар астероидов (Pravec и др., 2010) показывают, что главные астероиды пар при отношении масс много меньших 0.2 вращаются

быстро, вблизи их критической частоты деления. По мере приближения отношения масс к 0.2, период вращения главного астероида растет. Следовательно, пара астероидов может образоваться в результате вращательного деления родительского астероида и превращения его в двойную систему, которая распадается под действием собственной внутренней динамики вскоре после образования.

В работе (Pravec, Vokrouhlický, 2009) при анализе пар астероидов также были выделены шесть новых компактных скоплений (групп), состоящих из трех или более астероидов. Численное интегрирование в прошлое позволило предположить, что они являются молодыми семействами с возрастом менее 2 млн лет. В дальнейшем (Pravec и др., 2018) была показана тесная взаимосвязь между парами и молодыми (возраст менее 1 млн лет) семействами. Для 11 из 13 компактных групп астероидов наблюдается уменьшение периода осевого вращения главного астероида при приближении отношения масс к 0.2, аналогично зависимости, выявленной для пар астероидов (Pravec и др., 2010). Двумя исключениями являются группы с большим значением отношения масс $m_2/m_1 > 0.7$ — (18777) Hobson и (22280) Mandragora, для образования которых требуется другой механизм.

Были предложены два возможных механизма образования более чем одного фрагмента путем вращательного деления: процесс вторичного деления (Jacobson, Scheeres, 2011) и событие кратеро-

образующего столкновения с почти критически вращающимся родительским астероидом (Vokrouhlický и др., 2017). Из будущих исследований необходимо будет выявить, какие из групп были сформированы тем или иным процессом. Наиболее интригующей является возможность каскадного разрушения родительского тела для некоторых из групп (Pravec и др., 2018).

Современное состояние проблемы изучения молодых пар представлено в работе (Pravec и др., 2019). Новые фотометрические данные в целом подтверждают механизм образования пар, предложенный в (Pravec и др., 2010). Необходимо отметить весьма неправильную форму большинства исследованных астероидов и наличие крупных “бульжников” на поверхности некоторых из них. Особый интерес представляют 13 пар (примерно 1/3 от общего числа рассмотренных в работе (Pravec и др., 2019) пар), в которых главные астероиды входят в двойные или тройные системы.

В настоящей работе мы выполним исследование динамической эволюции пар астероидов с целью уточнения их возраста. Будут рассмотрены: 1) избранные молодые пары астероидов из (Pravec и др., 2019); 2) новые группы астероидов и новые члены известных групп, выделенные в работе (Kuznetsov, Vasileva, 2019) с помощью метрик Холшевникова; 3) пары астероидов, имеющих близкие значения метрик Холшевникова в пятимерном пространстве кеплеровых орбит и в трехмерном фактор-пространстве позиционных элементов орбит. Для повышения точности моделирования будем учитывать влияние эффекта Ярковского путем оценки скорости дрейфа большой полуоси орбиты на основе данных об орбитальных и физических параметрах исследуемого астероида и астероида (101955) Bennu (Spoto и др., 2015).

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДРЕЙФА БОЛЬШОЙ ПОЛУОСИ ОРБИТЫ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ЭФФЕКТОМ ЯРКОВСКОГО

Известно, что негравитационные тепловые эффекты играют важную роль в динамике малых тел. Фундамент современной теории эффекта Ярковского был заложен в работах (Vokrouhlický, 1998; 1999). Поскольку до сих пор не выполнены прямые измерения влияния эффекта Ярковского на большие полуоси орбит астероидов главного пояса, в работе Spoto и др. (2015) было предложено использовать калибровку скорости дрейфа большой полуоси орбиты астероида на основе физических и орбитальных параметров астероида (101955) Bennu для вычисления возраста 37 семейств астероидов главного пояса, образовавшихся в результате дробления родительских тел вследствие столкновений.

В настоящей работе мы используем этот подход для оценки максимальных значений модулей ускорения, обусловленного эффектом Ярковского, и скорости дрейфа больших полуосей орбит для некоторых пар астероидов с очень близкими орбитами и (потенциально) очень малым возрастом.

Как известно, негравитационное тангенциальное ускорение a_τ может быть выражено как (Marsden, 1973; Farnocchia и др., 2013; Del Vigna и др., 2018):

$$a_\tau = A_2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^d \tau, \tag{1}$$

где r – гелиоцентрическое расстояние, τ – единичный вектор. Коэффициент A_2 зависит от физических параметров астероида. Нормирующий множитель $r_0 = 1$ а. е. Показатель степени d определяется теплофизическими свойствами астероида и лежит в интервале от 0.5 до 3.5 (Farnocchia и др., 2013). Усредняя (1) по полному периоду, получим выражение для средней скорости дрейфа большой полуоси (Vokrouhlický, 1998):

$$\frac{da}{dt} = -\frac{8(1-A)\Phi}{9n} W(K, R) \cos \phi. \tag{2}$$

Здесь n – среднее движение; ϕ – наклон оси вращения астероида к плоскости орбиты. Альbedo Бонда A выражается через геометрическое альbedo p_v как $A = 1/3p_v$. Стандартный коэффициент силы излучения Φ в приближении сферического тела обратно пропорционален средней плотности ρ , диаметру астероида D и квадрату орбитального расстояния r^2 : $\Phi \sim (D\rho r^2)^{-1}$. Функция $W(K, R)$ определяется теплофизическими параметрами и частотой осевого вращения тела (для суточного эффекта Ярковского) (Vokrouhlický, 1998):

$$W(K, R) = -\frac{k_1\Theta}{1 + 2k_2\Theta + k_3\Theta^2} \approx -\frac{0.5\Theta}{1 + \Theta + 0.5\Theta^2} \approx -\frac{1}{5}. \tag{3}$$

Оценка выражения (3) получена в пределе большого тела, когда радиус тела много больше глубины слоя, в котором происходит переизлучение тепла. В этом случае все три коэффициента k примерно равны 1/2. Эффект Ярковского максимален, когда безразмерный тепловой параметр $\Theta \approx 1$.

Простой учет эффекта Ярковского, приводящего к вековым изменениям большой полуоси, можно получить путем нормализации, используя параметры астероида (101955) Bennu, поскольку они известны с малыми ошибками (Spoto и др., 2015):

$$\dot{a} \equiv \frac{da}{dt} = \left(\frac{da}{dt} \right)_B \frac{\sqrt{a_B(1-e_B^2)} D_B \rho_B \cos \phi}{\sqrt{a(1-e^2)} D \rho \cos \phi} \frac{1-A}{1-A_B}. \tag{4}$$

Здесь нижний индекс “В” указывает на астероид (101955) Bennu, для которого значение дрейфа большой полуоси $\dot{a}_B = (19 \pm 0.1) \times 10^{-4}$ а. е./млн лет). После подстановки физических параметров (101955) Bennu (Del Vigna и др., 2018), мы получим выражение для дрейфа большой полуоси за счет эффекта Ярковского (в единицах а. е./млн лет), если a выражено в а. е., диаметр D – в км, плотность ρ – в г/см³):

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = 12.09 \times 10^{-4} \frac{\cos \phi}{\sqrt{a(1-e^2)}} \frac{1-A}{D \rho}. \quad (5)$$

Поскольку наклон оси вращения к плоскости орбиты ϕ известен для небольшого числа астероидов, при получении оценок мы полагали $|\cos \phi| = 1$, что дает максимум модуля скорости дрейфа. Значение $(1 - A)$ обычно очень близко к единице. Средняя плотность ρ для большинства астероидов лежит в диапазоне от 1.0 до 3.3 г/см³. Для получения более точной оценки плотности необходимо учитывать таксономический класс изучаемых астероидов. Принимая для средней плотности значение $\rho = 1.1$ г/см³ (примерно соответствующее наименее плотному классу углистых хондритов), мы получаем максимальную оценку значения модуля дрейфа большой полуоси. В предположении равного альbedo диаметр D астероида можно оценить по абсолютной звездной величине H и значению геометрического альbedo p_v (Bowell и др., 1989):

$$D = 1329 \text{ км} \times 10^{-H/5} \times \frac{1}{\sqrt{p_v}}. \quad (6)$$

При оценке диаметров использовались абсолютные звездные величины и альbedo с сайтов Horizons (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) и ALCDEF (<http://alcdef.org/>).

В табл. 1 приведены оценки максимальных по модулю значений скорости дрейфа большой полуоси da/dt , обусловленных эффектом Ярковского, для некоторых пар астероидов, имеющих общее происхождение (Pravec и др., 2019).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ИЗБРАННЫХ ПАР

Для изучения динамической эволюции некоторых выделенных близких пар астероидов было выполнено численное моделирование на интервале времени 800 тыс. лет в прошлое с помощью интегратора Mercury (Chambers, 1999).

Выполнены три варианта интегрирования. В первом случае учитывались только возмущения от больших планет. Во втором – добавлены возмущения от Цереры, Весты, Юноны и Паллады. В третьем – добавлен учет суточного эффекта Ярковского.

В качестве основных критериев вероятной эпохи образования пары были приняты: 1) сходимость угловых орбитальных элементов (разность долгот восходящих узлов и разность аргументов перигелия); 2) минимальное значение относительной скорости, определяемое по Nesvorný, Vokrouhlický (2006), и z -компоненты относительной скорости, согласно работе (Rosaev, Plavalova, 2018).

В некоторых случаях были получены оценки возраста пар, значительно отличающиеся от значений, приведенных в работе (Pravec и др., 2019) (см. табл. 2, рис. 1–3). Эта проблема требует дальнейшего тщательного изучения в каждом конкретном случае.

Для пары (80218) 1999 VO123 – (213471) 2002 ES90 гистограмма сближений в работе (Pravec и др., 2019) имеет очень узкий вид, поэтому можно заключить, что данная пара образовалась примерно 140 тыс. лет назад, и наши расчеты это подтверждают. Аналогично для пар (52852) 1998 RB75–(250322) 2003 SC7, (5026) Martes–2005 WW113, (1741) Giclas–(258640) 2002 ER36, (26416) 1999 XM84–(214954) 2007 WO58 наши результаты находятся в хорошем согласии с результатами (Pravec и др., 2019). Заметим, что оценки возраста, приведенные в последнем столбце табл. 2, получены интегрированием номинальных орбит без учета негравитационных эффектов. Совпадение с результатами работы (Pravec и др., 2019) говорит о том, что для данных пяти пар негравитационные эффекты на рассматриваемом интервале времени не существенны. В настоящей работе мы уделим основное внимание **трем** оставшимся парам (выделены полужирным шрифтом в табл. 2): (21436) Chaoyichi–(334916) 2003 YK39, (46829) McMahon–2014 VR4, (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105, для которых полученные в настоящей работе оценки возраста существенно отличаются от оценок, приведенных в работе (Pravec и др., 2019).

Оценка возраста пары (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105

Главный астероид пары принадлежит к E-типу по классификации Толена (Tholen, 1984). По значению абсолютной звездной величины диаметр астероида (4765) Wasserburg может быть оценен в 2.15 км, диаметр (350716) 2001 XO105 составляет порядка 0.37 км. В работе (Pravec и др., 2019) отмечают, что возможно общее происхождение пары и астероида 2016 GL253, однако окончательный вывод можно будет сделать только после уточнения орбиты 2016 GL253.

По результатам интегрирования номинальной орбиты в программе Mercury оценка возраста пары составляет около 100 тыс. лет (см. рис. 1, 2).

Таблица 1. Оценки максимальных по модулю значений скорости дрейфа большой полуоси da/dt для некоторых пар астероидов

Номер пары	Астероид	H , зв. вел.	D , км	a , а. е.	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
1	(4765) Wasserburg	13.8	2.15	1.94574	2.282
	(350716) 2001 XO105	17.6	0.37	1.94574	13.135
2	(46829) McMahon	15.0	2.31	2.40021	2.872
	2014 VR4	18.0	0.58	2.40056	11.434
3	(21436) Chaoyichi	15.3	2.29	2.18625	3.030
	(334916) 2003 YK39	18.2	0.60	2.18663	11.519
4	(1741) Giclas	11.4	10.62	2.88320	0.536
	(258640) 2002 ER36	15.8	1.40	2.88572	4.065
5	(2110) Moore-Sitterly	13.4	6.41	2.19854	1.130
	(44612) 1999 RP27	15.5	2.20	2.19804	3.249
6	(3749) Balam	13.3	4.54	2.23699	1.442
	(312497) 2009 BR60	17.7	0.60	2.23656	10.943
7	(4905) Hiromi	12.2	9.76	2.60132	0.667
	(7813) Anderserikson	13.1	6.04	2.60032	1.068
8	(5026) Martes	13.9	8.00	2.37782	1.842
	2005 WW113	17.8	1.33	2.37756	11.10
9	(6369) 1983 UC	14.2	3.34	2.29269	2.009
	(510132) 2010 UY57	18.2	0.53	2.29294	12.677
10	(7343) Ockeghem	14.3	2.92	2.19294	2.297
	(154634) 2003 XX38	16.8	0.92	2.19276	7.264
11	(8306) Shoko	14.9	2.42	2.24199	2.887
	2011 SR158	18.1	0.55	2.24136	12.602
12	(9783) Tensho-kan	14.06	4.40	2.66889	1.448
	(348018) 2003 SF334	17.1	1.08	2.66844	5.874
13	(10123) Fideoja	14.55	2.29	2.26930	2.834
	(117306) 2004 VF21	16.4	0.98	2.26905	6.644
14	(17198) Gorjup	15	2.31	2.27942	2.883
	(229056) 2004 FC126	17.5	0.73	2.28066	9.116
15	(25021) Nischakumar	15.7	2.19	2.31840	3.138
	(453818) 2011 SJ109	18.4	0.63	2.31733	10.882
16	(25884) Asai	14.7	1.45	1.95432	4.192
	(48527) 1993 LC1	16.1	1.39	1.95430	5.146
17	(26416) 1999 XM84	14.3	3.18	2.34188	2.044
	(214954) 2007 WO58	16.8	1.01	2.34234	6.464
18	(26420) 1999 XL103	15.7	1.67	2.19730	4.058
	2012 TS209	18.4	0.48	2.19707	14.070
19	(43008) 1999 UD31	15.7	1.67	2.34803	4.024
	(441549) 2008 TM68	17.5	0.73	2.34733	9.225
20	(44620) 1999 RS43	15.6	1.75	2.17589	3.956
	(295745) 2008 UN98	17.6	0.70	2.17656	9.932

Таблица 1. Окончание

Номер пары	Астероид	H , зв. вел.	D , км	a , а. е.	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
21	(49791) 1999 XF31	15.8	0.86	2.31640	4.226
	(436459) 2011 CL97	18.4	0.26	2.31658	13.98
22	(52852) 1998 RB75	14.8	2.15	2.26263	2.985
	(250322) 2003 SC7	16.8	0.86	2.26294	7.497
23	(80218) 1999 VO123	16.6	1.18	2.21814	5.631
	(213471) 2002 ES90	16.9	1.04	2.21872	6.466

Таблица 2. Оценки возраста пар астероидов

Астероид 1	Астероид 2	Возраст, тыс. лет (Pravec и др., 2019)	Возраст, тыс. лет (настоящая работа)
(4765) Wasserburg	(350716) 2001 XO105	200	100
(46829) McMahon	2014 VR4	800	150
(21436) Chaoyichi	(334916) 2003 YK39	30	30–120
(5026) Martes	2005 WW113	18	18
(1741) Giclas	(258640) 2002 ER36	200	180
(52852) 1998 RB75	(250322) 2003 SC7	500	470
(26416) 1999 XM84	(214954) 2007 WO58	270	300
(80218) 1999 VO123	(213471) 2002 ES90	140	140

В настоящее время большая полуось орбиты астероида (4765) Wasserburg несколько меньше, чем у (350716) 2001 XO105. В то же время, диаметр (4765) Wasserburg значительно больше диаметра (350716) 2001 XO105. Соответственно, ожидаемая величина дрейфа большой полуоси за счет эффекта Ярковского у (350716) 2001 XO105 больше. На основании этого мы можем исключить все значения $(da/dt)_{350716} < 0$ ($A_2 < 0$), так как при рассмотрении эволюции в прошлое орбиты в паре будут расходиться.

При учете эффекта Ярковского в распределении скоростей появляется вторичный минимум (рис. 3), соответствующий совпадению больших полуосей в паре, как показано на рис. 4, при этом первичный минимум, соответствующий близости угловых элементов (номинальная орбита) сохраняется. Отметим, что чем меньше скорость дрейфа большой полуоси, обусловленная эффектом Ярковского, тем дальше по времени находится вторичный минимум.

Таким образом, учет негравитационных эффектов при определении возраста пар позволяет компенсировать разности больших полуосей вблизи номинальной орбиты. Действительно, как видно на рис. 3, большие полуоси (4765) Wasserburg и (350716) 2001 XO105 примерно совпадают в интервале 300–350 тыс. лет назад, что вызывает появление вторичного минимума относительной скорости на рис. 4. Количественное согласование

графиков на рис. 3 и 4 требует детального учета эффекта Ярковского для каждого из астероидов пары. Очевидно, максимального эффекта учета негравитационных сил следует ожидать, когда вторичный и первичный минимумы совпадают, т.е. большие полуоси астероидов в паре совпадают в ту же эпоху, когда совпадают угловые элементы.

Оценка возраста пары (46829) McMahon–2014 VR4

Пара (46829) McMahon–2014 VR4 исследована в работе (Pravec и др., 2019). Показано, что главный астероид пары (46829) McMahon представляет собой двойную систему с отношением диаметров 0.4 и орбитальным периодом 16.833 ч. По значению абсолютной звездной величины диаметр (46829) McMahon может быть оценен в 2.3 км, диаметр 2014 VR4 – около 0.35 км.

По результатам интегрирования номинальных орбит в программе Mercury получена оценка возраста пары – около 150 тыс. лет (рис. 5–7).

В настоящее время большая полуось орбиты астероида (46829) McMahon несколько меньше, чем у 2014 VR4. Эта разница очень мала и составляет 1.5×10^{-4} а. е. Диаметр астероида (46829) McMahon значительно больше диаметра 2014 VR4. Соответственно, ожидаемая величина скорости дрейфа большой полуоси за счет эффекта Ярков-

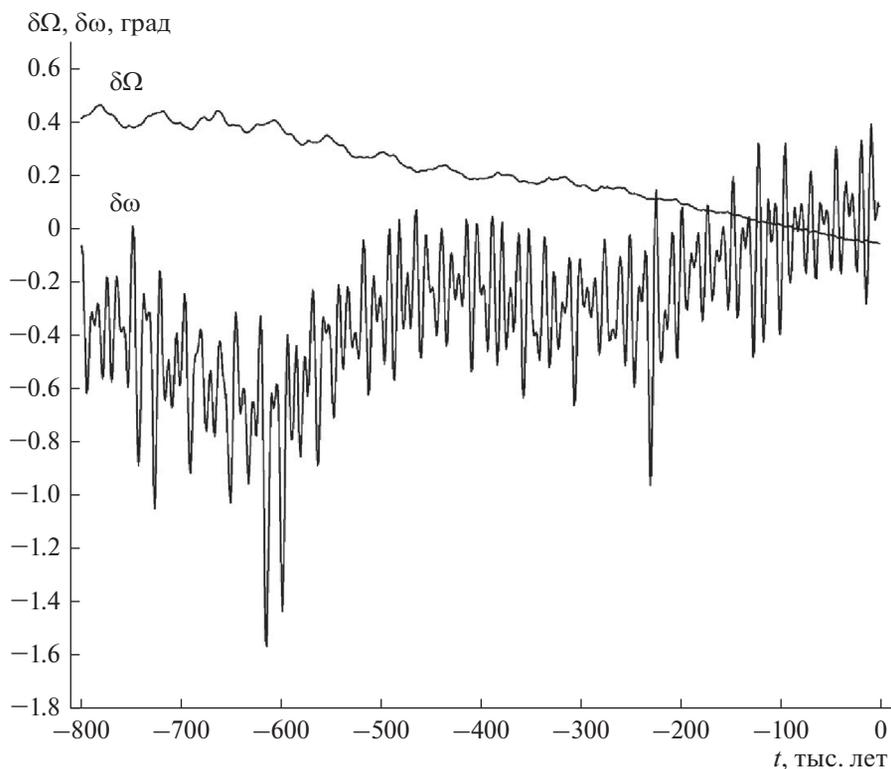


Рис. 1. Эволюция разности аргументов перигелия $\delta\omega$ и разности долгот восходящих узлов $\delta\Omega$ для пары (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105 без учета эффекта Яковлевского.

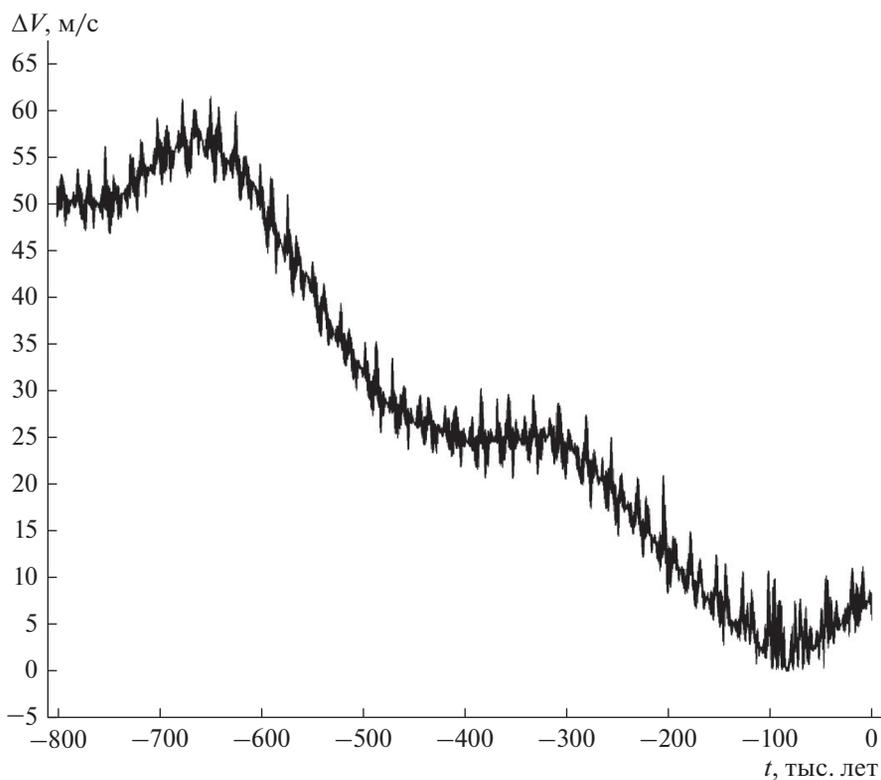


Рис. 2. Изменение относительной скорости Δv для пары (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105 без учета эффекта Яковлевского.

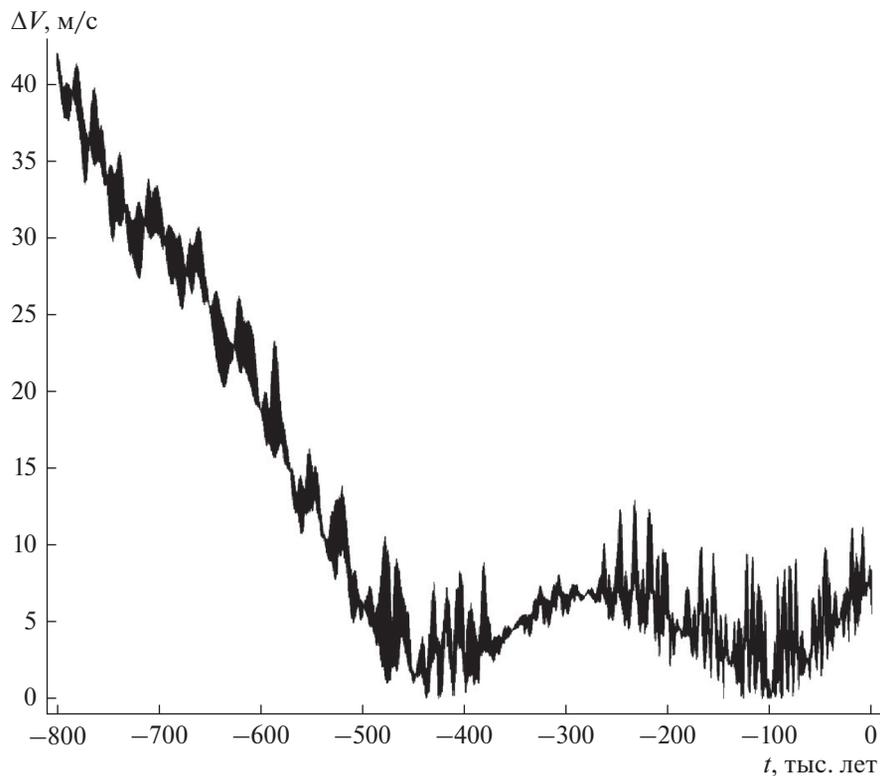


Рис. 3. Изменение относительной скорости Δv для пары (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105 при значениях скорости дрейфа большой полуоси $(da/dt)_{4765} = 2.5 \times 10^{-4}$ а. е./млн лет и $(da/dt)_{350716} = 4.4 \times 10^{-4}$ а. е./млн лет).

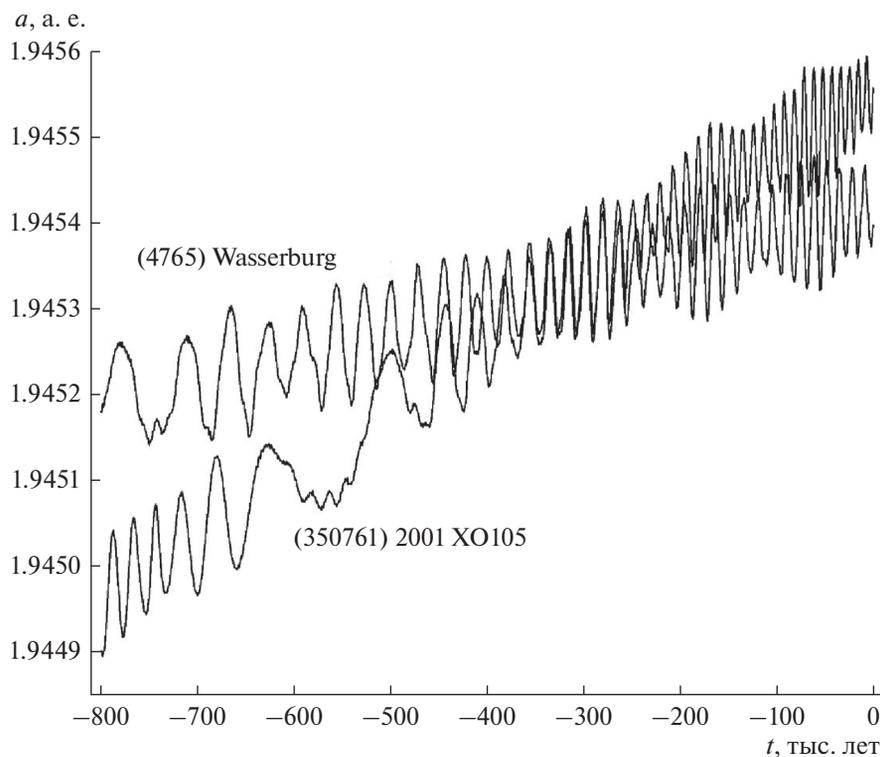


Рис. 4. Эволюция больших полуосей орбит для пары (4765) Wasserburg–(350716) 2001 XO105 при значениях скорости дрейфа $(da/dt)_{4765} = 2.5 \times 10^{-4}$ а. е./млн лет и $(da/dt)_{350716} = 4.4 \times 10^{-4}$ а. е./млн лет).

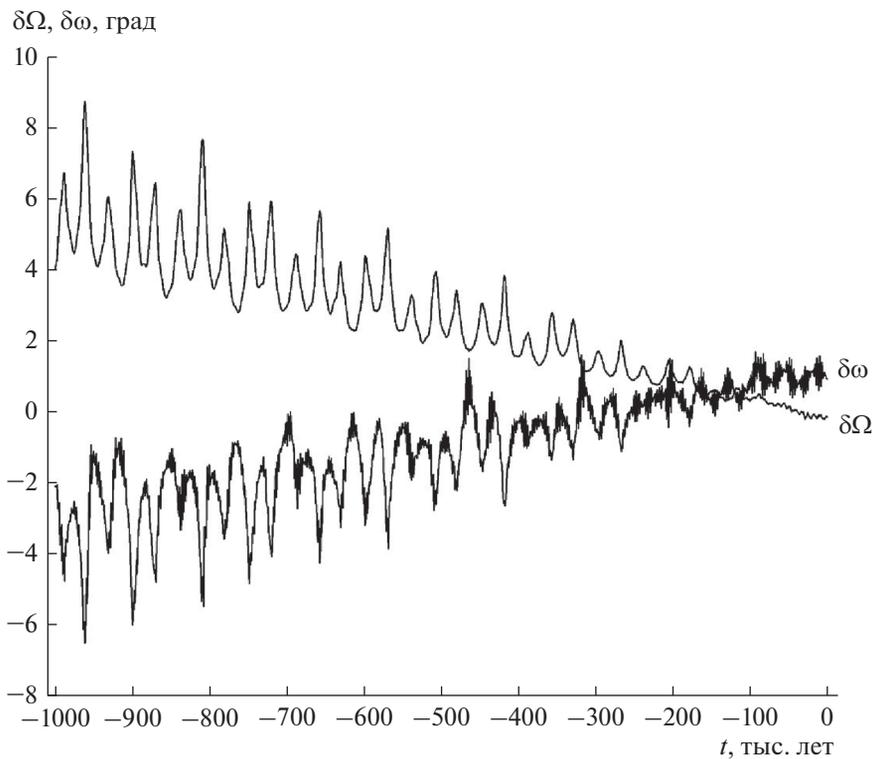


Рис. 5. Эволюция разности аргументов перигелия $\delta\omega$ и разности долгот восходящих узлов $\delta\Omega$ для пары (46829) McMa-
hon–2014 VR4 без учета эффекта Ярковского.

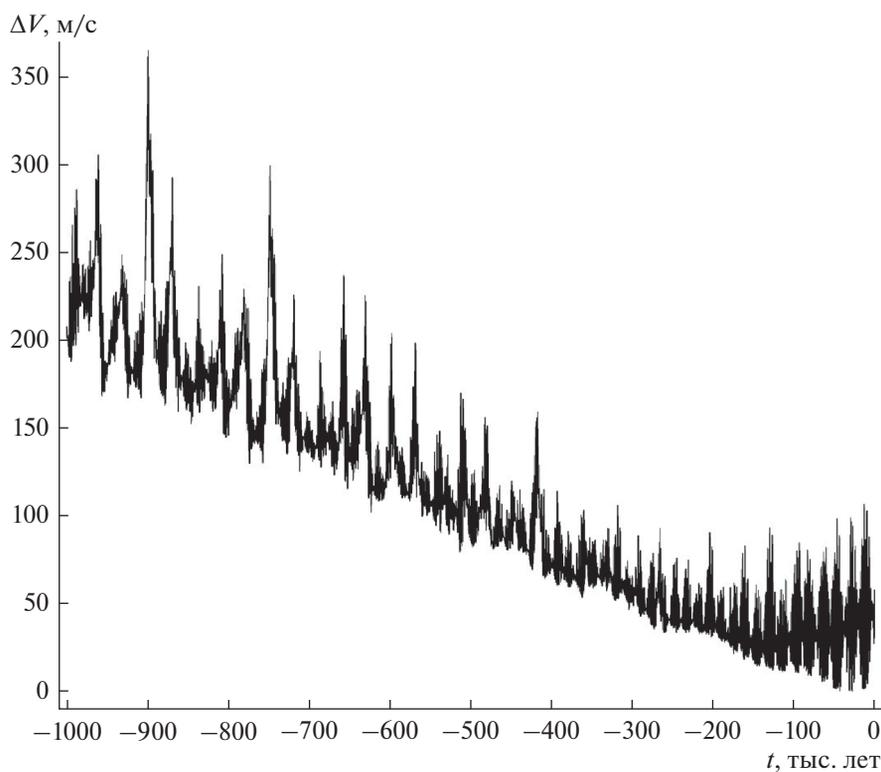


Рис. 6. Изменение относительной скорости Δv для пары (46829) McMa-
hon–2014 VR4 без учета эффекта Ярковского.

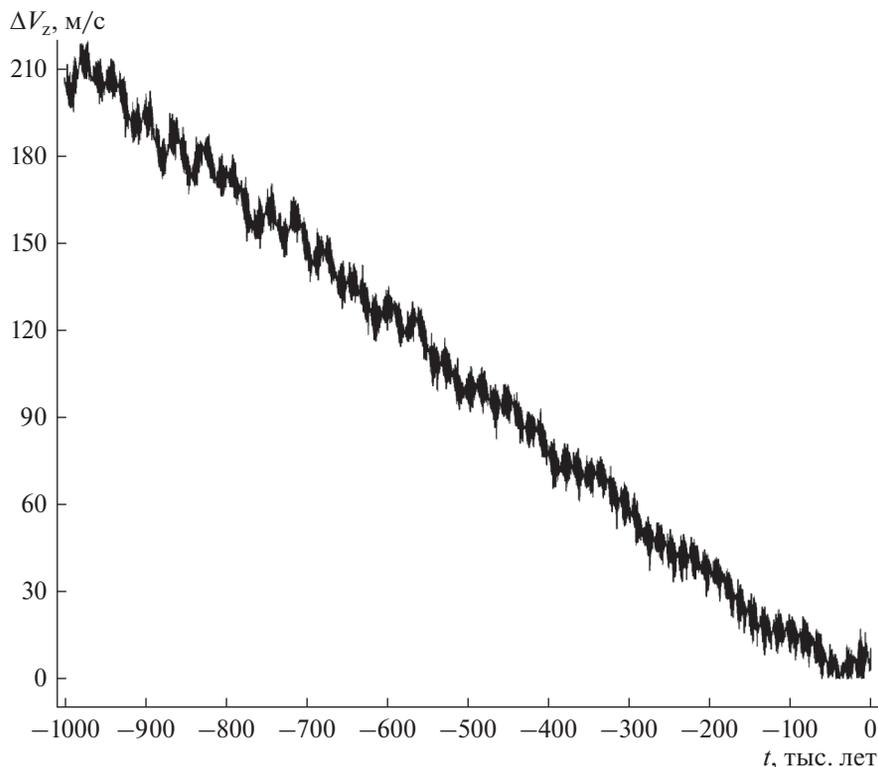


Рис. 7. Изменение z -компоненты относительной скорости Δv_z для пары (46829) McMahoon–2014 VR4 без учета эффекта Ярковского.

ского у 2014 VR4 больше, следовательно, мы можем исключить все значения $(da/dt)_{2014VR} < 0$ ($A_2 < 0$), так как при интегрировании в прошлое орбиты в паре расходятся.

Если принять, что роль учета негравитационных эффектов при определении возраста пар сводится к компенсации разности больших полуосей вблизи номинальной орбиты, то это означает, что возраст этой пары весьма мал.

Отметим, что скорость расхождения угловых элементов довольно велика, порядка 5 градусов за миллион лет. Совпадение долготы узла имеет место около 50 тыс. лет назад, в то время как для аргумента перигелия это происходит ранее, примерно 150 тыс. лет назад (рис. 5).

Как отмечено в работе (Pravec и др., 2019), орбита 2014 VR4 плохо определена, поэтому была выполнена вариация начальных условий для этого астероида в диапазоне: $\Delta a = 1 \times 10^{-7}$ а. е., $\Delta e = 1 \times 10^{-6}$, $\Delta i = 1 \times 10^{-5}$, $\Delta \omega = 1 \times 10^{-5}$, $\Delta \Omega = 1 \times 10^{-5}$, $\Delta M = 1 \times 10^{-5}$ относительно номинальных значений орбиты. В результате не было обнаружено существенного изменения условий сходимости по сравнению с номинальной орбитой.

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

Исследование пары (21436) Chaoyichi–(334916) 2003 YK39, выполненное в (Pravec и др., 2019) показало, что главный астероид пары (21436) Chaoyichi представляет собой двойную систему с орбитальным периодом 81.19 ч. В работе (Pravec и др., 2019) сделан вывод, что это молодая пара астероидов, показывающая орбитальную сходимость около 30 тыс. лет назад. Однако по результатам нашего интегрирования, возраст пары может составлять от 30 до 120 тыс. лет в зависимости от скорости дрейфа большой полуоси под влиянием эффекта Ярковского (рис. 8).

ПОИСК КАНДИДАТОВ В МОЛОДЫЕ ПАРЫ АСТЕРОИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТРИК ХОЛШЕВНИКОВА

Поиск кандидатов в молодые пары астероидов осуществлялся путем вычисления значений метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 (Kholshchevnikov и др., 2016; Холшевников, Щепалова, 2018). Обозначения метрик соответствуют обозначениям, используемым в работах (Kholshchevnikov и др., 2016; Холшевников, Щепалова, 2018). Метрика ρ_2 – это расстояние между двумя орбитами в пятимерном пространстве кеплеровских орбит. Метрика ρ_5 –

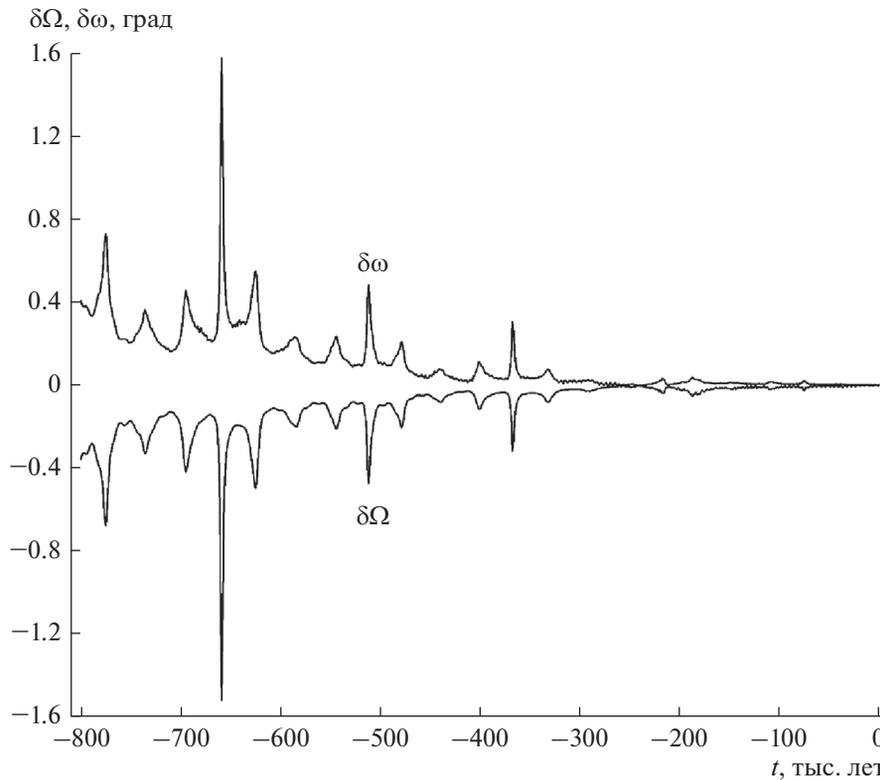


Рис. 8. Эволюция разности аргументов перигелия $\delta\omega$ и разности долгот восходящих узлов $\delta\Omega$ для пары (21436) Chaoyichi–(334916) 2003 YK39 без учета эффекта Ярковского.

это расстояние в трехмерном фактор-пространстве позиционных орбитальных элементов. Для вычисления метрики ρ_2 использовались оскулирующие элементы орбит, а для вычисления метрики ρ_5 использовались собственные элементы орбит. Орбитальные элементы астероидов были взяты из Asteroids Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>) на эпоху MJD 58400 (00^h 00^m 00^s 09.10.2018). Критерии для отбора новых молодых пар астероидов были следующие: $\rho_2 < 0.001$ (а. е.)^{1/2}, $\rho_5 < 0.001$ (а. е.)^{1/2} и $\rho_2 - \rho_5 < 0.0001$ (а. е.)^{1/2}. В результате были отобраны 13 пар астероидов (см. табл. 3 и 4).

Для всех отобранных пар было выполнено численное моделирование орбитальной эволюции. Интервалы интегрирования составляли от 10 до 300 тыс. лет в прошлое в зависимости от рассматриваемых пар. Использовалась программа Orbit9 (<http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>), входящая в программный комплекс OrbFit (Orbfit Consortium, 2011). Учитывались возмущения от больших планет, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и дрейф большой полуоси орбиты, обусловленный влиянием эффекта Ярковского. Максимальное по модулю значение скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{\max}$ вследствие влияния эффекта Ярковского оценивалось на ос-

нове соотношения (5). Используемые значения физических параметров приведены в табл. 5.

Поскольку для астероидов, входящих в исследуемые пары, положение оси вращения в пространстве не известно, были рассмотрены сценарии эволюции при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси, соответствующих различной ориентации оси вращения астероида относительно плоскости его орбиты: $da/dt = 0$ 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.

Момент образования пары соответствует условиям, когда расстояние между астероидами имеет тот же порядок, что и радиус сферы Хилла R_H , а относительная скорость Δv имеет значение, сравнимое со второй космической скоростью V_2 . Радиус сферы Хилла оценивался по формуле (Pravec и др., 2019):

$$R_H \approx a \frac{D}{2} \left(\frac{4\pi G \rho}{9 \mu} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

где G – гравитационная постоянная, μ – гравитационный параметр Солнца. Вторую космическую скорость (ejection velocity, escape velocity, скорость убегания) необходимо определять относительно более массивного астероида на астероидоцентри-

Таблица 3. Абсолютные звездные величины H и элементы орбит астероидов, входящих в пары с близкими значениями метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	ω , град	Ω , град
(355258) 2007 LY4	18.74	2.21766951	0.14286133	2.796231	129.855707	114.130057
(404118) 2013 AF40	17.86	2.21767075	0.14288970	2.796253	129.855786	114.124936
(53576) 2000 CS47	15.59	2.22041221	0.14095182	5.548189	270.853490	334.154230
(421781) 2014 QG22	18.08	2.22037630	0.14108163	5.547248	270.845820	334.147151
(88259) 2001 HJ7	15.15	1.93511386	0.06459107	20.190467	226.943191	290.409673
(337181) 1999 VA117	17.15	1.93525079	0.06448745	20.189823	226.944188	290.386850
(26416) 1999 XM84	14.31	2.34231193	0.05100552	4.528056	263.034037	286.509459
(214954) 2007 WO58	16.93	2.34280980	0.05033013	4.533637	263.025525	286.606899
(95750) 2003 ED28	16.11	2.35618548	0.11259739	7.647965	27.824442	271.746720
(304873) 2007 RD148	16.93	2.35646984	0.11272017	7.649581	27.842354	271.705854
(180906) 2005 KB6	17.47	2.23675524	0.11561351	3.841025	87.149164	196.987010
(217266) 2003 YR67	17.47	2.23645596	0.11561496	3.840784	87.144404	197.059891
(229401) 2005 SU152	16.51	2.64229720	0.31774007	12.518852	54.015885	298.099076
2005 UY97	17.42	2.64232794	0.31769725	12.519220	54.016017	298.104078
(87887) 2000 SS286	15.18	2.75325273	0.11502458	8.358111	299.176451	163.677232
(415992) 2002 AT49	16.42	2.75325987	0.11513100	8.359055	299.188087	163.633166
(63440) 2001 MD30	15.11	1.93801199	0.08850713	19.988969	229.456912	205.513266
(331933) 2004 TV14	17.42	1.93802038	0.08851992	19.988941	229.456389	205.528775
(356713) 2011 UK160	16.62	2.29000029	0.20834886	4.969929	170.446608	146.847887
2014 QX220	18.60	2.29001789	0.20829181	4.969743	170.453524	146.851181
(320025) 2007 DT76	16.08	2.84055449	0.10353204	14.207760	345.763920	118.483517
(489464) 2007 DP16	17.22	2.84062033	0.10335351	14.208523	345.767328	118.542589
(405222) 2003 RV20	17.73	2.36985187	0.19562520	2.331847	83.070106	292.235899
2010 TH35	18.82	2.36950818	0.19616392	2.331566	83.066633	292.153056
(21436) Chaoyichi	15.27	2.18622043	0.08555621	3.736489	320.316813	178.323869
(334916) 2003 YK39	18.11	2.18621721	0.08552992	3.736462	320.316119	178.286986

Таблица 4. Значения метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5

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}
(355258) 2007 LY4	(404118) 2013 AF40	0.392	0.376	0.016
(53576) 2000 CS47	(421781) 2014 QG22	1.761	1.739	0.022
(88259) 2001 HJ7	(337181) 1999 VA117	1.616	1.532	0.084
(26416) 1999 XM84	(214954) 2007 WO58	8.330	8.239	0.091
(95750) 2003 ED28	(304873) 2007 RD148	4.727	4.630	0.097
(180906) 2005 KB6	(217266) 2003 YR67	1.273	1.151	0.122
(229401) 2005 SU152	2005 UY97	0.782	0.657	0.125
(87887) 2000 SS286	(415992) 2002 AT49	2.284	2.043	0.241
(63440) 2001 MD30	(331933) 2004 TV14	0.344	0.103	0.241
(356713) 2011 UK160	2014 QX220	1.058	0.771	0.287
(320025) 2007 DT76	(489464) 2007 DP16	4.092	3.537	0.555
(405222) 2003 RV20	2010 TH35	9.982	9.352	0.630
(21436) Chaoyichi	(334916) 2003 YK39	1.384	0.533	0.851

Таблица 5. Физические и динамические параметры астероидов, входящих в пары с близкими значениями метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5

Астероид	p_v	ρ , г/см ³	D , км	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
(355258) 2007 LY4	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	0.59 ³⁾	12.2
(404118) 2013 AF40	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	0.89 ³⁾	8.1
(53576) 2000 CS47	0.357 ⁴⁾	2.72 ⁵⁾	1.851 ⁴⁾	1.5
(421781) 2014 QG22	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	0.81 ³⁾	8.9
(88259) 2001 HJ7	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	3.09 ³⁾	2.2
(337181) 1999 VA117	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	1.28 ³⁾	5.9
(26416) 1999 XM84	0.24 ⁶⁾	2.72 ⁵⁾	3.75 ⁶⁾	0.7
(214954) 2007 WO58	0.24 ⁵⁾	2.72 ⁵⁾	1.18 ³⁾	2.3
(95750) 2003 ED28	0.2 ⁵⁾	2.72 ⁵⁾	1.71 ³⁾	1.6
(304873) 2007 RD148	0.2 ⁵⁾	2.72 ⁵⁾	1.30 ³⁾	2.1
(180906) 2005 KB6	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	1.12 ³⁾	6.3
(217266) 2003 YR67	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	1.17 ³⁾	6.1
(229401) 2005 SU152	0.1 ⁶⁾	2.72 ⁵⁾	2.11 ⁶⁾	1.4
2005 UY97	0.1 ⁷⁾	1.1 ²⁾	1.46 ³⁾	5.0
(87887) 2000 SS286	0.2 ⁸⁾	2.72 ⁸⁾	2.43 ⁸⁾	1.1
(415992) 2002 AT49	0.2 ⁸⁾	2.72 ⁸⁾	1.36 ⁸⁾	1.9
(63440) 2001 MD30	0.3 ⁶⁾	2.67 ⁶⁾	2.21 ⁶⁾	1.3
(331933) 2004 TV14	0.3 ¹¹⁾	1.1 ²⁾	0.73 ³⁾	9.8
(356713) 2011 UK160	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	1.70 ³⁾	4.3
2014 QX220	0.154 ¹⁾	1.1 ²⁾	0.68 ³⁾	10.7
(320025) 2007 DT76	0.057 ¹⁰⁾	1.33 ¹⁰⁾	3.35 ¹⁰⁾	1.6
(489464) 2007 DP16	0.057 ¹⁰⁾	1.33 ¹⁰⁾	1.93 ¹⁰⁾	3.2
(405222) 2003 RV20	0.2 ⁵⁾	1.1 ²⁾	0.86 ³⁾	8.1
2010 TH35	0.2 ⁵⁾	1.1 ²⁾	0.57 ³⁾	12.3
(21436) Chaoyichi	0.222 ⁹⁾	2.72 ⁹⁾	1.953 ⁹⁾	1.4
(334916) 2003 YK39	0.24 ⁵⁾	2.72 ⁵⁾	0.62 ³⁾	4.5
(90265) 2003 CL5	0.24 ⁶⁾	2.72 ⁶⁾	1.71 ⁶⁾	1.6
2002 RH291	0.24 ⁶⁾	2.72 ⁶⁾	0.82 ⁶⁾	3.5

Примечания.

- 1) В случае отсутствия данных о геометрическом альbedo, используем значение $p_v = 0.154$ (Del Vigna и др., 2018).
- 2) В случае отсутствия данных о плотности, полагаем $\rho = 1.1$ г/см³.
- 3) Оценка диаметра получена по формуле (6).
- 4) Данные получены с сайта The JPL Small-Body Database (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>).
- 5) Значение соответствует таксономическому классу S (Warner и др., 2009).
- 6) Данные получены с сайта ALCDEF – Asteroid Lightcurve Photometry Database (<http://alcdef.org/>).
- 7) Значение соответствует семейству астероидов (1547) Nele (по данным сайта Asteroids Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>)).
- 8) (Žižka и др., 2016).
- 9) (Mainzer и др., 2016).
- 10) Значение соответствует таксономическому классу C (Warner и др., 2009).
- 11) Значение соответствует семейству астероидов (434) Hungaria (по данным сайта Asteroids Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>)).

ческом расстоянии Δr , равном относительному расстоянию между центрами масс астероидов:

$$V_2 = \left(\frac{\pi G \rho D^3}{3 \Delta r} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

При оценке радиуса сферы Хилла R_H (7) и второй космической скорости V_2 (8) использовались

значения физических параметров, приведенные в табл. 5.

Характеристики наиболее тесных сближений астероидов в парах с близкими значениями метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 приведены в табл. 6. Оценки моментов сближений Δt даны в годах от эпохи MJD 58400 в прошлое и соответствуют оценке возраста пар. Для моментов сближений

Таблица 6. Сближения астероидов в парах с близкими значениями метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5

Астероид 1 – Астероид 2	$(da/dt)_1 \times 10^4$, а. е./млн лет	$(da/dt)_2 \times 10^4$, а. е./млн лет	Δt , лет	Δr , км	R_H , км	Δv , м/с	V_2 , м/с
(21436) Chaoyichi – (334916) 2003 YK39	0 0.7	0 2.2	68316 28564	444 1571	396	0.092 0.143	0.056 0.030
(53576) 2000 CS47 – (421781) 2014 QG22	–1.5	4.4	6315	1978	381	0.517	0.025
(87887) 2000 SS286 – (415992) 2002 AT49	0 0.5 1.1 –0.5	–0.9 1.9 1.9 –0.9	5754 5603 5635 5717	1312 1087 1133 1374	621	0.061 0.061 0.060 0.080	0.046 0.050 0.049 0.045
(88259) 2001 HJ7 – (337181) 1999 VA117	1.1	3.0	68820	4063	542	0.288	0.024
(180906) 2005 KB6 – (217266) 2003 YR67	–3.2 –3.2	3.0 6.1	13956 15940	1631 844	180	0.081 0.177	0.009 0.012
(320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16	0 0.8 1.6 1.6 –0.8 –0.8 –1.6 –1.6	0 –1.6 1.6 –1.6 –1.6 –3.2 –1.6 –3.2	23436 14632 23212 13462 18722 14670 23670 16302	1026 1341 727 1060 842 1150 1157 1218	696	0.058 0.046 0.047 0.121 0.036 0.095 0.103 0.106	0.058 0.051 0.069 0.057 0.064 0.055 0.054 0.054
(355258) 2007 LY4 – (404118) 2013 AF40	–6.1 –12.2	8.1 0	5990 6284	1027 1136	136	0.013 0.013	0.007 0.007

указаны относительные расстояния Δr между центрами масс астероидов и относительные скорости Δv , а также скорости дрейфа большой полуоси da/dt для обоих астероидов в парах. Радиусы сферы Хилла R_H оценивались для более массивных астероидов пары в предположении о равной плотности астероидов, составляющих пару. Как правило, таким астероидом является первый астероид пары (Астероид 1). Исключение – пара (355258) 2007 LY4 – (404118) 2013 AF40, для которой приведена оценка радиуса Хилла для второго, более крупного, чем первый, астероида (404118) 2013 AF40. Местные вторые космические скорости V_2 вторичных астероидов (Астероид 2) относительно первичных астероидов вычислялись для астероидоцентрического расстояния, равного Δr .

В табл. 6 включены только те пары, для которых были зафиксированы сближения астероидов до относительного расстояния Δr , не превышающего $10 R_H$ при относительной скорости Δv менее $20 V_2$.

Для пары (320025) 2007 DT76 – (489464) 2007 DP16 получено большое количество сближений до расстояния $1-2 R_H$ при относительной скорости Δv не превышающей $1-2 V_2$ для различных

комбинаций скоростей дрейфа больших полуосей орбит астероидов (см. табл. 6). Оценка возраста пары от 13.5 до 23.7 тыс. лет существенно зависит от величины эффекта Ярковского. Полученный результат согласуется с оценкой возраста, данной в работе (Žižka и др., 2016) – более 10 тыс. лет.

Для пары (87887) 2000 SS286–(415992) 2002 AT49 оценка возраста, полученная при различных комбинациях скорости дрейфа больших полуосей, составила от 5.6 до 5.75 тыс. лет (см. табл. 6), что меньше оценки 7.4 ± 0.3 тыс. лет, полученной в работе (Žižka и др., 2016). Возможно, это связано с тем, что в работе (Žižka и др., 2016) дополнительно учитывались возмущения от карликовой планеты (1) Ceres и массивных астероидов (4) Vesta и (2) Pallas.

Для пары (355258) 2007 LY4–(404118) 2013 AF40 наиболее тесные сближения получены для моментов 6.0 и 6.3 тыс. лет в прошлое (см. табл. 6). Это не противоречит результатам работы (Žižka и др., 2016), в которой отмечается наличие решений, дающих оценку возраста пары менее 10 тыс. лет, но указывается, что вероятно, возраст этой пары более 10 тыс. лет.

Таблица 7. Абсолютная звездная величина H и оскулирующие элементы орбит в эпоху JD2458600.5 (27.04.2019) для астероидов семейства (10321) Rampo и шести новых членов (2009 SR371, 2013 RL101, 2013 VC30, 2015 TA367, 2015 TM372, 2017 UN21)

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	Ω , град	ω , град
(10321) Rampo	14.3	2.32929654	0.09451023	6.059377	53.930128	278.914305
(294272) 2007 UM101	17.4	2.32918698	0.09482895	6.054291	53.213462	280.474647
(451686) 2013 BR67	17.5	2.32841575	0.09349234	6.093002	61.746026	266.907659
2006 UA169	18.21	2.32820021	0.09461694	6.076101	58.407277	272.153337
2009 SR371	18.64	2.32986574	0.09438199	6.069057	56.788624	274.412137
2013 RL101	18.31	2.32783602	0.09408911	6.090678	61.666087	267.070822
2013 VC30	18.32	2.32881785	0.09439361	6.080032	59.357228	270.304580
2014 HS9	18.32	2.32833926	0.09405895	6.075180	58.558743	271.628400
2015 HT91	17.97	2.32875731	0.09360219	6.085600	62.102665	266.033285
2015 TA367	18.69	2.32946303	0.09450946	6.056170	53.308070	279.770011
2015 TM372	18.47	2.32902982	0.09402477	6.073099	57.712708	273.442908
2016 TE87	18.08	2.32900948	0.09429489	6.071889	57.975833	272.188785
2017 UN21	18.36	2.32814613	0.09405711	6.090230	60.372004	269.084325

Минимальная оценка возраста пары (53576) 2000 CS47–(421781) 2014 QG22 составила 6.3 тыс. лет (см. табл. 6). В работе (Pravec и др., 2019) дана оценка возраста этой пары 157–472 тыс. лет. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения оценки возраста пары.

Пара астероидов (180906) 2005 KB6–(217266) 2003 YR67 была впервые выявлена нами. Результаты анализа динамической эволюции позволяют оценить минимальный возраст пары, который составляет 14–16 тыс. лет (см. табл. 6).

Оценки возраста пары (21436) Chaoyichi–(334916) 2003 YK39 от 29 до 68 тыс. лет (см. табл. 6) согласуются с результатами, полученными в данной статье с использованием интегратора Mercury – 30–120 тыс. лет, и с оценкой (Pravec и др., 2019) – 10–140 тыс. лет при наиболее вероятном значении 31 тыс. лет.

Минимальная оценка возраста пары (88259) 2001 HJ7–(337181) 1999 VA117, которая составила 69 тыс. лет (см. табл. 6), согласуется с результатом, полученным в работе (Pravec и др., 2019)– 31–289 тыс. лет при наиболее вероятном значении 62 тыс. лет.

Полученные результаты показывают работоспособность метода поиска молодых пар астероидов на основе анализа значений метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 . Для уточнения возраста пар и оценки ошибки его определения требуется исследовать вероятностную эволюцию орбит астероидов в пределах ошибок определения элементов орбит, а также получить надежные оценки скорости дрейфа большой полуоси орбиты под влиянием эффекта Ярковского по результатам наблюдений.

ПОИСК ГРУПП АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТРИК ХОЛШЕВНИКОВА

В работе (Kuznetsov, Vasileva, 2019) для поиска новых групп астероидов на близких орбитах и новых членов известных групп использовались метрики Холшевникова ρ_2 и ρ_5 . Расчет метрик выполнялся на основе оскулирующих элементов на эпоху JD 2458600.5 (00^h 00^m 00^s 27.04.2019) из базы данных AstOrb (<https://asteroid.lowell.edu/main/astorb>). Критерием отбора являлось одновременное выполнение двух условий: $\rho_2 < 0.008$ а. е.^{1/2}, $\rho_5 < 0.002$ а. е.^{1/2}. Были найдены шесть новых членов семейства (10321) Rampo: 2009 SR371, 2013 RL101, 2013 VC30, 2015 TA367, 2015 TM372, 2017 UN21 (см. табл. 7), которые отсутствуют в списке, приведенном в работе (Pravec, Vokrouhlický, 2009). Обнаружен новый член семейства (18777) Hobson – 2017 SQ83 (см. табл. 8), отсутствующий в списке в работе (Rosaev, Plavalova, 2018). Были открыты две новые группы астероидов, содержащие по три астероида: первая – (381362) 2008 EP15, (405843) 2006 VT227, 2012 XC32 (см. табл. 9), вторая – (338073) 2002 PY38, 2012 TZ97, 2016 SQ14 (см. табл. 10).

Физические и динамические параметры астероидов семейств (10321) Rampo, (18777) Hobson и групп (381362) 2008 EP15, (338073) 2002 PY38 приведены в табл. 11–14. Диаметры астероидов D оценивались по формуле (6), радиусы сфер Хилла R_H – по формуле (7), значение второй космической скорости на поверхности астероида V_2 – по формуле (8), максимальная оценка скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{\max}$ – по формуле (5).

Таблица 8. Абсолютная звездная величина H и оскулирующие элементы орбит в эпоху JD2458600.5 (27.04.2019) для астероидов семейства Hobson и нового члена (2017 SQ83)

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	Ω , град	ω , град
(18777) Hobson	14.9	2.56191728	0.18419395	4.322799	105.451408	180.908963
(57738) 2001 UZ160	15.1	2.56496633	0.18019357	4.318260	104.884888	181.701140
(363118) 2001 NH14	17.2	2.56605029	0.17859316	4.310118	105.135559	181.321779
(381414) 2008 JK37	17.4	2.56515007	0.17987608	4.322242	104.249644	182.012740
(436620) 2011 LF12	17.1	2.56149886	0.18523962	4.326803	104.899661	180.513243
(450571) 2006 JH35	17.4	2.56178818	0.18375382	4.318529	105.207240	180.223548
(465404) 2008 HQ46	17.5	2.56473196	0.18160230	4.316522	105.252292	182.693788
(520394) 2014 JJ10	17.9	2.56238876	0.18224748	4.317460	105.046534	180.171577
2014 NH103	18.05	2.56211678	0.18245273	4.313593	105.196569	179.499816
2014 OJ66	18.73	2.56437271	0.17893535	4.309766	105.104017	179.248519
2015 KA91	18.03	2.56196135	0.18474768	4.329910	104.212394	180.439359
2017 SQ83	18.23	2.56486842	0.17983420	4.314888	105.600323	180.852998

Таблица 9. Абсолютная звездная величина H и оскулирующие элементы орбит в эпоху JD2458600.5 (27.04.2019) для астероидов группы (381362) 2008 EP15

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	Ω , град	ω , град
(381362) 2008 EP15	18.5	2.23806492	0.10416666	2.048556	147.678143	309.297086
(405843) 2006 BT227	17.8	2.23781905	0.10386769	2.058774	146.863245	310.391675
2012 XC32	18.9	2.23803758	0.10459085	2.055633	147.445954	309.749324

Таблица 10. Абсолютная звездная величина H и оскулирующие элементы орбит в эпоху JD2458600.5 (27.04.2019) для астероидов группы (338073) 2002 PY38

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	Ω , град	ω , град
(338073) 2002 PY38	18.4	2.19661436	0.17595141	0.888066	159.452602	161.046152
2010 TZ97	18.68	2.19668609	0.17646132	0.912520	157.581805	163.632981
2016 SQ14	18.82	2.19721231	0.17603668	0.911184	157.835641	163.151964

Исследование динамической эволюции групп (381362) 2008 EP15 и (338073) 2002 PY38, а также новых астероидов в семействах (10321) Rampo и (18777) Hobson выполнялось на интервале времени 100 тыс. лет с использованием программы Orbit9. Рассматривались сценарии эволюции при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси, соответствующих различной ориентации оси вращения астероида относительно плоскости его орбиты: $da/dt = 0$ 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. Вблизи моментов сближений проводилось дополнительное интегрирование с малым шагом с использованием программы Mercury. В результате не было зафиксировано тесных сближений астероидов на расстояние, сравнимое с радиусом сферы Хилла. На основании результа-

тов моделирования можно сделать вывод, что возраст групп (381362) 2008 EP15 и (338073) 2002 PY38 превышает 100 тыс. лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе при поиске молодых пар астероидов и анализе их орбитальной эволюции с целью оценки возраста применялись три подхода: анализ сходимости орбитальных элементов, анализ метрик пространства кеплеровых орбит, анализ относительных координат и скоростей астероидов при тесных сближениях. Все применяемые методы показали хорошие результаты с точки зрения надежности получаемых оценок, что подтверждается сравнением с работами других авторов.

Таблица 11. Физические и динамические параметры астероидов семейства (10321) Rampo и шести новых членов (2009 SR371, 2013 RL101, 2013 VC30, 2015 TA367, 2015 TM372, 2017 UH21)

Астероид	D , км	R_H , км	V_2 , м/с	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
(10321) Rampo	3.25	673.8	1.88	0.78
(294272) 2007 UM101	0.89	185.6	0.52	2.83
(451686) 2013 BR67	0.86	177.2	0.49	2.96
2006 UA169	0.62	127.7	0.36	4.11
2009 SR371	0.51	104.9	0.29	5.00
2013 RL101	0.59	121.9	0.34	4.30
2013 VC30	0.59	121.5	0.34	4.32
2014 HS9	0.59	121.4	0.34	4.32
2015 HT91	0.69	142.7	0.40	3.68
2015 TA367	0.50	102.5	0.29	5.12
2015 TM372	0.55	113.4	0.32	4.63
2016 TE87	0.65	135.7	0.38	3.87
2017 UH21	0.58	119.2	0.33	4.40

Таблица 12. Физические и динамические параметры астероидов семейства (18777) Hobson и нового члена (2017 SQ83)

Астероид	D , км	R_H , км	V_2 , м/с	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
(18777) Hobson	2.76	629.4	1.60	0.94
(57738) 2001 UZ160	2.46	561.7	1.43	1.06
(363118) 2001 NH14	1.08	245.6	0.62	2.42
(381414) 2008 JK37	0.98	224.7	0.57	2.64
(436620) 2011 LF12	1.13	257.6	0.65	2.31
(450571) 2006 JH35	0.98	223.6	0.57	2.66
(465404) 2008 HQ46	0.94	214.6	0.54	2.77
(520394) 2014 JJ10	0.78	177.7	0.45	3.34
2014 NH103	0.73	165.8	0.42	3.58
2014 OJ66	0.53	121.3	0.31	4.89
2015 KA91	0.73	167.3	0.43	3.55
2017 SQ83	0.67	152.7	0.38	3.89

Таблица 13. Физические и динамические параметры астероидов группы (381362) 2008 EP15

Астероид	D , км	R_H , км	V_2 , м/с	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
(381362) 2008 EP15	2.16	331.4	0.85	3.39
(405843) 2006 BT227	2.98	457.4	1.17	2.46
2012 XC32	1.77	271.9	0.69	4.13

Таблица 14. Физические и динамические параметры астероидов группы (338073) 2002 PY38

Астероид	D , км	R_H , км	V_2 , м/с	$ da/dt _{\max} \times 10^4$, а. е./млн лет
(338073) 2002 PY38	2.26	340.6	0.89	3.34
2010 TZ97	1.99	299.4	0.78	3.79
2016 SQ14	1.86	280.8	0.73	4.05

Выполненное исследование позволяет сделать вывод, что негравитационные эффекты, и прежде всего, суточный эффект Ярковского, который проявляется в вековых возмущениях большой полуоси орбиты, необходимо учитывать при реконструкции динамической эволюции пар астероидов, имеющих общее происхождение. Этот вывод согласуется с результатами работ (Kuznetsov, Safronova, 2018; Kuznetsov и др., 2018; 2019).

Для определения скорости дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного влиянием эффекта Ярковского, требуется знать орбитальные параметры, теплофизические свойства поверхности и форму астероида, параметры осевого вращения, которые можно получить из высокоточных позиционных наблюдений, многоцветной фотометрии, а также спектральных наблюдений астероидов. В Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета осуществляется проект KASPAR по детальному изучению избранных пар астероидов на основе позиционных и многоцветных фотометрических наблюдений (Kuznetsov и др., 2018).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-02-00015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Холшевников К.В., Щепалова А.С. О расстояниях между орбитами планет и астероидов // Вестн. С. Петерб. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5(63). Вып. 3. С. 509–523.
- 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.
- 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.
- Deienno R., Gomes R.S., Walsh K.J., Morbidelli A., Nesvorný D. Is the Grand Tack model compatible with the orbital distribution of main belt asteroids? // Icarus. 2016. V. 272. P. 114–124.
- Del Vigna A., Faggioli L., Milani A., Spoto F., Farnocchia D., Carry B. Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // Astron. and Astrophys. 2018. V. 617. Article id. A61.
- Farnocchia D.S., Chesley S.R., Vokrouhlický D., Milani A., Spoto F., Bottke W.F. Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // Icarus. 2013. V. 224. P. 1–13.
- Granvik M., Morbidelli A., Vokrouhlický D., Bottke W.F., Nesvorný D., Jedicke R. Escape of asteroids from the main belt // Astron. and Astrophys. 2017. V. 598. Article id. A52.
- Jacobson S.A., Scheeres D.J. Dynamics of rotationally fissioned asteroids: source of observed small asteroid systems // Icarus. 2011. V. 214. P. 161–178.
- Kholshchikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhanyan 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.
- Kuznetsov E., Safronova V. Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // Planet. and Space Sci. 2018. V. 157. P. 22–27.
- Kuznetsov E.D., Glamazda D.V., Kaiser G.T., Krushinsky V.V., Popov A.A., Safronova V.S., Shagabudinov A.A., Ustinov D.S., Vibe Yu.S. Pairs of asteroids in close orbits // Meteorit. and Planet. Sci. 2018. V. 53. Iss. S1. Article id. A159.
- Kuznetsov E.D., Potoskuev A.E., Safronova V.S., Ustinov D.S. Dynamical evolution of asteroid pairs with close orbits // Proc. X All-Russian Conf. “Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics” (FAPMM 2018). AIP Conf. Proc. 2019. V. 2103. Iss. 1. P. 020008-1–020008-6.
- Kuznetsov E.D., Vasileva M.A. On new members of asteroid clusters similar to asteroid pairs // Meteorit. and Planet. Sci. 2019. V. 54. Iss. S2. Article id. A229.
- 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.
- Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K. Comets and nongravitational forces. V // Astron. J. 1973. V. 78. P. 211–225.
- Nesvorný D., Vokrouhlický D. New candidates for recent asteroid breakups // Astron. J. 2006. V. 132. P. 1950–1958.
- Orbfit Consortium. OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. Astrophysics Source Code Library. 2011. arXiv:1106.015.
- Pravec P., Vokrouhlický D. Significance analysis of asteroid pairs // Icarus. 2009. V. 204. P. 580–588.
- Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D., Scheeres D.J., Harris A.W., Galád A., Vaduvescu O., Pozo F., Barr A., Longa P., Vachier F., Colas F., Pray D.P., Pollock J., Reichart D., Ivarsen K., Haislip J., LaCluyze A., Kušnirák P., Henych T., Marchis F., Macomber B., Jacobson S.A., Krugly Yu. N., Sergeev A.V., Leroy A. Formation of asteroid pairs by rotational fission // Nature. 2010. V. 466. P. 1085–1088.
- Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheeres D.J., Kušnirák P., Hornoch K., Galád A., Vraštil J., Pray D.P., Krugly Yu.N., Gaftonyuk N.M., Inasaridze R. Ya., Ayvazian V.R., Kvaratskhelia O.I., Zhuzhunadze V.T., Hugarik M., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Világi J., Kornoš L., Gajdoš Š., Burkhonov O., Ehgamberdiev Sh.A., Donchev Z., Borisov G., Bonev T., Rumyantsev V.V., Molotov I.E. Asteroid clusters similar to asteroid pairs // Icarus. 2018. V. 304. P. 110–126.
- Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheirich P., Ďurech J., Scheeres D.J., Kušnirák P., Hornoch K., Galad A., Pray D.P., Krugly Yu. N., Burkhonov O., Ehgamberdiev Sh. A., Pollock J., Moskovitz N., Thirouin A., Ortiz J.L., Morales N., Husarik M., Inasaridze R. Ya., Oey J., Polishook D., Hanuš J., Kučáková H., Vraštil J., Vilagi J., Gajdoš Š., Kornoš L., Vereš P., Gaftonyuk N.M., Hromakina T., Sergeyev A.V., Slyusarev I.G., Ayvazian V.R., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Colas F., Vachier F., Slivan S., Skiff B., Marchis F., Ergashev K.E., Kim D.-H., Aznar A., Serran-Ricart M., Behrend R., Roy R., Manzini F., Molotov I.E.

- Asteroid pairs: A complex picture // *Icarus*. 2019. V. 333. P. 429–463.
- Rosaev A., Plavalova E.* On relative velocity in very young asteroid families // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 135–142.
- Spoto F., Milani A., Knezevic Z.* Asteroid family ages // *Icarus*. 2015. V. 257. P. 275–289.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry // PhD thesis. Tucson: Univ. Arizona, 1984.
- Vokrouhlický D.* Diurnal Yarkovsky effect as a source of mobility of meter-sized asteroidal fragments. I. Linear theory // *Astron. and Astrophys.* 1998. V. 335. P. 1093–1100.
- Vokrouhlický D.* A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 344. P. 362–366.
- Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of asteroids probably of a common origin // *Astron. J.* 2008. V. 136. P. 280–290.
- 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. Article id. A91. 19 p.
- Warner B.D., Harris A.W., Pravec P.* The asteroid lightcurve database // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 134–146.
- 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. Article id. A20.