

УДК 521.1

ПОИСК НОВЫХ ЧЛЕНОВ МОЛОДЫХ СЕМЕЙСТВ АСТЕРОИДОВ

© 2025 г. Э. Д. Кузнецов^{а, *}, М. А. Васильева^а, А. С. Перминов^а, В. С. Сафронова^а

^а Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

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

Поступила в редакцию 18.05.2024 г.

После доработки 21.06.2024 г.

Принята к публикации 29.09.2024 г.

Поиск новых членов молодых семейств астероидов представляет интерес для изучения истории формирования этих семейств. В работе рассмотрены 17 молодых семейств. Для молодых семейств характерна сильная кластеризация как собственных, так и оскулирующих элементов орбит. При поиске кандидатов в новые члены молодых семейств анализировались оскулирующие элементы орбит. Оценивались метрики Холшевникова, анализировалось поведение узлов и перицентров, выполнялся поиск низкоскоростных сближений. Для всех отобранных кандидатов с помощью пакета программ OrbFit рассчитывались синтетические собственные элементы орбит, на основе которых делался вывод о принадлежности астероида семейству. В результате найдены новые члены для восьми молодых семейств астероидов.

Ключевые слова: семейства астероидов, собственные элементы орбиты, численное моделирование, метрики Холшевникова

DOI: 10.31857/S0320930X25010041, EDN: LPUCIA

ВВЕДЕНИЕ

В 1918 г., анализируя распределения собственных значений больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов гелиоцентрических орбит астероидов, Hirayama обнаружил первые примеры статистически значимых концентраций (Hirayama, 1918). Он ввел термин “семейства астероидов”, предположив, что семейства представляют собой совокупности астероидов, связанных с родительскими телами, которые разрушились когда-то в прошлом. Источником этих катастрофических событий он считал столкновения астероидов.

В настоящее время предложено еще несколько механизмов разрушения родительских тел, ведущих к формированию семейств астероидов: распад быстро вращающегося родительского тела (Pravess 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 семейства (Pravess и др., 2018).

Особый интерес исследователей вызывают молодые семейства астероидов, возраст которых не превышает нескольких (до 10) миллионов лет. Условно, среди этой группы семейств выделяют очень молодые — с возрастом до 2 млн лет (см., например, Pravess и др., 2018) и экстремально молодые — с возрастом менее 1 млн лет (см., например, Vokrouhlický и др., 2024). Исследование динамической эволюции молодых семейств представляет интерес с точки зрения изучения истории их формирования. Появляется возможность на основе результатов численного моделирования установить возраст отдельных членов семейства и их групп. Молодость семейств и близость их орбит позволяют, в частности, при предварительном поиске членов семейства использовать пять оскулирующих элементов (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i , долгота восходящего узла Ω , аргумент перицентра ω), а не ограничиваться тремя собственными элементами (большая полуось a_p , эксцентриситет e_p , наклон i_p), как это принято для обычных семейств. Современное состояние проблемы изучения молодых семейств астероидов

представлено в ряде работ (см., например, Pravec и др., 2018; Vokrouhlický и др., 2024).

В настоящей работе мы планируем рассмотреть 17 молодых семейств с целью поиска новых членов (см. табл. 1). В табл. 1 для каждого семейства приведены: количество астероидов, значения позиционных оскулирующих элементов орбит a_{fam} , e_{fam} , i_{fam} главного астероида семейства и диапазон изменения этих элементов для астероидов, входящих в семейство, по данным сайта Asteroids Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>). Элементы орбит даны с точностью до четвертого десятичного знака. В случае, если модуль разности элементов

орбит астероидов не превышает 0.00005 в соответствующих единицах, указывается нулевое значение. Очевидно, что чаще всего это реализуется для малочисленных семейств.

Поиск кандидатов в новые члены семейств начинаем с анализа оскулирующих элементов орбит, на основе которых оцениваем метрики Холшевникова и проверяем возможность сближений узлов и перигелиев. Затем для всех кандидатов и астероидов семейств рассчитываем синтетические собственные элементы орбит. Окончательный вывод о принадлежности кандидатов семействам делаем на основе анализа собственных элементов орбит.

Таблица 1. Позиционные оскулирующие элементы орбит молодых семейств астероидов на эпоху MJD 60200

Семейство астероидов	Количество членов	a_{fam} , а. е.	e_{fam}	i_{fam} , град
Adelaide	79	$2.2450^{+0.0040}_{-0.0006}$	$0.1017^{+0.0028}_{-0.0031}$	$5.9988^{+0.0655}_{-0.0000}$
Brugmansia	3	$2.6209^{+0.0007}_{-0.0015}$	$0.2187^{+0.0016}_{-0.0008}$	$1.6247^{+0.0019}_{-0.0022}$
Datura	92	$2.2346^{+0.0025}_{-0.0035}$	$0.2081^{+0.0029}_{-0.0032}$	$5.9863^{+0.0814}_{-0.1565}$
Emilkowalski	9	$2.6006^{+0.0000}_{-0.0014}$	$0.1503^{+0.0060}_{-0.0041}$	$17.7538^{+0.0168}_{-0.2824}$
Hobson	59	$2.5634^{+0.0029}_{-0.0026}$	$0.1834^{+0.0039}_{-0.0055}$	$4.3217^{+0.0111}_{-0.0179}$
Iochroma	5	$2.4442^{+0.0019}_{-0.0005}$	$0.1627^{+0.0000}_{-0.0039}$	$3.4214^{+0.0081}_{-0.0028}$
Irvine	4	$2.1675^{+0.0000}_{-0.0007}$	$0.0146^{+0.0004}_{-0.0000}$	$5.4046^{+0.0232}_{-0.0000}$
Kap'bos	5	$2.2507^{+0.0004}_{-0.0006}$	$0.0944^{+0.0004}_{-0.0100}$	$3.6916^{+0.0005}_{-0.0632}$
Lucascavin	3	$2.2809^{+0.0005}_{-0.0004}$	$0.1127^{+0.0000}_{-0.0012}$	$5.9805^{+0.0005}_{-0.0005}$
Mandragora	8	$3.0393^{+0.0178}_{-0.0066}$	$0.1975^{+0.0051}_{-0.0066}$	$0.5655^{+0.0343}_{-0.0173}$
Martes	6	$2.3783^{+0.0000}_{-0.0022}$	$0.2419^{+0.0024}_{-0.0000}$	$4.2829^{+0.0123}_{-0.0000}$
Nicandra	5	$2.6357^{+0.0007}_{-0.0014}$	$0.2442^{+0.0032}_{-0.0009}$	$3.6050^{+0.3225}_{-0.0000}$
Rampo	42	$2.3285^{+0.0013}_{-0.0014}$	$0.0952^{+0.0006}_{-0.0026}$	$6.0609^{+0.0410}_{-0.0260}$
Rozek	3	$1.9384^{+0.0000}_{-0.0010}$	$0.0886^{+0.0000}_{-0.0007}$	$19.9859^{+0.0000}_{-0.0589}$
Schulhof	12	$2.6109^{+0.0010}_{-0.0026}$	$0.1207^{+0.0051}_{-0.0015}$	$13.5351^{+0.1833}_{-0.0888}$
Wasserburg	8	$1.9452^{+0.0005}_{-0.0000}$	$0.0601^{+0.0004}_{-0.0002}$	$23.7143^{+0.0000}_{-0.0084}$
2002 PY38	3	$2.1961^{+0.0009}_{-0.0000}$	$0.1764^{+0.0002}_{-0.0004}$	$0.8889^{+0.0241}_{-0.0000}$

ПОИСК КАНДИДАТОВ В НОВЫЕ ЧЛЕНЫ МОЛОДЫХ СЕМЕЙСТВ

Для поиска кандидатов в новые члены молодых семейств мы использовали каталог оскулирующих элементов орбит астероидов с сайта Asteroids Dynamic Site — AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>). Использование оскулирующих элементов орбит оправдано, поскольку не для всех астероидов известны собственные элементы орбит, а молодые семейства астероидов формируют тесные кластеры не только в пространстве собственных, но и оскулирующих элементов орбит (см., например, Vokrouhlický и др., 2024). Такие кластеры выделяются как в трехмерном пространстве кеплеровых позиционных элементов орбит (a, e, i) , так и в пятимерном (без учета положения тела на орбите) пространстве кеплеровых элементов орбит $(a, e, i, \Omega, \omega)$. В связи с этим, для определения расстояния между орбитами членов семейства и кандидатов мы использовали метрики Холшевникова ρ_5 и ρ_2 (Kholshchevnikov и др., 2016; Холшевников, Щепалова, 2018; Холшевников и др., 2020). Метрика Холшевникова ρ_5 определяет расстояние между орбитами в пространстве позиционных кеплеровых элементов орбиты. Метрика ρ_2 — в пятимерном пространстве.

На первом шаге вычислялись значения метрик Холшевникова ρ_5 и ρ_2 между орбитой кандидата и орбитами всех членов семейства и определялись максимальные значения метрик $(\rho_5)_{\max}$ и $(\rho_2)_{\max}$. В качестве критериев использовались максимальные значения метрик $(\rho_5)_{\text{fam}}$ и $(\rho_2)_{\text{fam}}$ между всеми возможными парами орбит известных астероидов семейства. Орбиты кандидатов в новые члены семейства должны одновременно удовлетворять двум условиям:

$$(\rho_5)_{\max} \leq (\rho_5)_{\text{fam}} \text{ и } (\rho_2)_{\max} \leq (\rho_2)_{\text{fam}}. \quad (1)$$

На втором шаге, чтобы исключить случайную близость орбит, для членов семейства и отобранных кандидатов на основе номинальных орбит выполнялось численное моделирование динамической эволюции в прошлое. Использовался пакет Mercury 6.2 (Chambers, 1999). Учитывались возмущения от восьми больших планет и карликовой планеты Плутон. Выполнялся анализ эволюции метрик ρ_5 и ρ_2 между орбитами кандидатов и членов семейства в оскулирующих элементах. Проверялся критерий сходимости узлов и перицентров орбит кандидатов (одновременное обращение в нуль разностей долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и аргументов перицентров $\Delta\omega$) с орбитами

членов семейства. Выполнялся поиск низкоскоростных сближений (анализировалась эволюция относительных расстояний Δr и скоростей Δv) кандидатов и членов семейств. Необходимым условием принадлежности кандидата семейству является близость моментов наступления следующих событий: 1) низкоскоростного сближения кандидата с одним из астероидов семейства; 2) достижения минимумов метрик ρ_5 и ρ_2 ; 3) схождения узлов и перицентров ($\Delta\Omega \approx 0$, $\Delta\omega \approx 0$).

На третьем шаге для отобранных кандидатов определялись синтетические собственные элементы орбит (Knezevic, Milani, 2000; 2003; Knezevic и др., 2002). Использовался программный комплекс OrbFit (Orbfit Consortium, 2011; <http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>). При моделировании динамической эволюции учитывались возмущения от восьми больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты. Усложнение по сравнению со вторым шагом модели возмущающих сил связано с необходимостью более детального описания орбитальной эволюции при определении собственных элементов орбит. Интервал интегрирования составлял 2 млн лет. Это достаточно большой интервал для того, чтобы на нем проявились эффекты, связанные со стохастическими свойствами орбитальной эволюции астероидов. В связи с этим, для каждого астероида оценивался старший показатель Ляпунова LCE. Начальная эпоха — MJD 60200 (13.09.2023). Для каждого кандидата были получены собственные элементы a_p , e_p , i_p , среднее движение n и собственные частоты движения узлов s и перицентров g . Собственные элементы орбит для членов всех рассмотренных молодых семейств приведены в электронном приложении (см. табл. П1–П17 в (Perminov, 2024)).

Оценки старшего показателя Ляпунова LCE, полученные на основе результатов численного моделирования, по порядку величины равны $1\text{--}10$ (млн лет) $^{-1}$, что соответствует временам Ляпунова $0.1\text{--}1$ млн лет. Как известно, проявления хаоса в эволюции узлов и перицентров наступают на интервалах на $2\text{--}3$ порядка более длительных, чем хаос в положении на орбите, а для позиционных элементов — на интервалах на $4\text{--}6$ порядков более длительных (Холшевников, Кузнецов, 2007). Соответственно, на интервале 2 млн лет поведение орбит астероидов будет носить регулярный характер.

Окончательное решение о принадлежности кандидатов семействам принималось на четвертом шаге после сравнения значений метрики ρ_5 , вычисляемых на основе собственных элементов

орбит. Для астероидов — членов семейства, вычислялись метрики ρ_5 для всех возможных пар астероидов и находились два максимальных значения: K_1 — среди пар, в которые входит главный астероид семейства, и K_2 — среди всех пар. Для астероидов — кандидатов в члены семейства, вычислялись метрики ρ_5 для всех возможных пар с астероидами семейства и находились два максимальных значения: L_1 — среди пар, в которые входит главный астероид семейства, и L_2 — среди всех пар. Для новых членов семейства должно выполняться одно из двух условий:

$$L_1 \leq K_1 \text{ или } L_2 \leq K_2. \quad (2)$$

Условие (2) допускает изменение значений критериев K_1 и K_2 при включении новых астероидов в состав семейства, что обеспечивает гибкость критерия при применении его к реальным семействам. Выполнение условия (2) гарантирует, что рассматриваемый кандидат является членом семейства, но при этом могут быть отброшены те астероиды, которые принадлежат семейству, особенно в случае малочисленности семейства. В зависимости от механизма формирования семейства и его возраста, значения критериев могут быть увеличены: αK_1 и βK_2 ($\alpha > 1$, $\beta > 1$). Уточнение можно выполнить на основе результатов моделирования, которое планируется провести в будущем. В настоящей работе мы проводим поиск новых членов семейств, которые укладываются

в диапазон вариаций собственных элементов орбит известных членов семейств.

НОВЫЕ ЧЛЕНЫ МОЛОДЫХ СЕМЕЙСТВ АСТЕРОИДОВ

В соответствии с методикой, изложенной в предыдущем разделе, для поиска кандидатов в новые члены этих семейств использовался каталог оскулирующих элементов орбит астероидов с сайта AstDyS на эпоху MJD 60200 (13.09.2023), в котором содержалась информация об 1283207 объектах (среди них, 629007 нумерованных астероидов, 549491 астероид, наблюдавшийся в нескольких оппозициях, 104709 астероидов, наблюдавшихся в одной оппозиции). Результаты отбора кандидатов среди астероидов Главного пояса приведены в табл. 2. Во втором столбце указано количество членов молодых семейств. В третьем столбце — количество кандидатов, отобранных из каталога AstDyS в соответствии с диапазоном оскулирующих элементов орбит из табл. 1. В четвертом столбце дано число кандидатов, удовлетворяющих условиям (1). В последнем столбце — количество кандидатов, отобранных для определения собственных элементов орбиты. Из 17 рассмотренных молодых семейств астероидов кандидаты в новые члены найдены для девяти семейств.

На третьем этапе для отобранных астероидов были определены собственные элементы орбит.

Таблица 2. Количество кандидатов в новые члены молодых семейств астероидов

Семейство астероидов	Количество членов	Отобрано кандидатов из каталога	Количество кандидатов, удовлетворяющих условиям (1)	Отобрано кандидатов для определения собственных элементов
Adelaide	79	4	4	3
Brugmansia	3	1	1	1
Datura	92	0	—	—
Emilkowalski	9	15	13	11
Hobson	59	0	—	—
Iochroma	5	2	2	2
Irvine	4	0	—	—
Kap'bos	5	0	—	—
Lucascavin	3	0	—	—
Mandragora	8	16	16	11
Martes	6	0	—	—
Nicandra	5	7	7	7
Rampo	42	0	—	—
Rozek	3	2	2	2
Schulhof	12	47	44	25
Wasserburg	8	0	—	—
2002 PY38	3	12	12	11

Приведем результаты, полученные по результатам анализа собственных элементов орбит астероидов, входящих в молодые семейства, и кандидатов в новые члены. Для каждого молодого семейства дан краткий обзор сведений, приведены оценки критериев K_1 и K_2 , максимальных значений L_1 и L_2 метрики ρ_5 для собственных элементов орбит кандидатов, отобранных на трех первых шагах методики, сделан вывод о наличии новых членов семейств.

Семейство Adelaide

Семейство Adelaide было открыто в 2019 г. Novaković и Radović (2019) и содержало всего пять объектов. Семейство расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.25$ а. е., $e = 0.10$, $i = 5.99^\circ$). Возраст семейства составляет приблизительно 500 тыс. лет (Novaković, Radović, 2019), что относит его к очень молодым семействам. В работах (Carruba и др., 2020; Vokrouhlický и др., 2021; 2024; Novaković и др., 2022) выполнен поиск новых членов семейства. Семейство Adelaide является одним из самых крупных среди молодых семейств и содержит 79 членов (Vokrouhlický и др., 2024). В табл. 3 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Adelaide. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит 79 известных членов семейства (см. табл. П1 в (Perminov, 2024)). Из трех кандидатов два астероида — 2020 HG179 и 2020 BE131 — удовлетворяют условию (2) и входят в семейство. Количество членов семейства астероидов Adelaide возросло до 81 (табл. П1 в (Perminov, 2024)).

Таблица 3. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Adelaide

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00183$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00272$ (а. е.) ^{1/2}			
2015 BP523	0.00227	0.00405	Нет
2020 HG179	0.00047	0.00195	Да
2020 BE131	0.00081	0.00185	Да

Семейство Brugmansia

Семейство Brugmansia расположено в средней части Главного пояса ($a = 2.62$ а. е., $e = 0.22$, $i = 1.62^\circ$). Семейство Brugmansia, включающее три астероида, было открыто в 2006 г. (Nesvorný,

Vokrouhlický, 2006). В работе (Nesvorný и др., 2006) были получены оценки возраста семейства 50–250 тыс. лет. В статье (Pravec и др., 2018) подтвержден состав семейства из трех астероидов. В работе (Vasileva, Kuznetsov, 2022) показано, что астероид 2006 SK443 может входить в семейство Brugmansia. Этот астероид соответствует требованиям к кандидатам в члены семейства и, как видно из табл. 4, удовлетворяет условию (2). Таким образом, количество членов семейства Brugmansia увеличилось до четырех (см. табл. П2 в (Perminov, 2024)).

Таблица 4. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидата в члены семейства Brugmansia

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00019$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00019$ (а. е.) ^{1/2}			
2006 SK443	0.00007	0.00013	Да

Семейство Datura

Семейство Datura в количестве семи астероидов было выделено в 2006 г. (Nesvorný и др., 2006; Nesvorný, Vokrouhlický, 2006). Семейство расположено во внутренней части Главного пояса астероидов ($a = 2.23$ а. е., $e = 0.21$, $i = 5.99^\circ$). Первоначальная оценка возраста 450 ± 50 тыс. лет (Nesvorný и др., 2006) впоследствии была уточнена и составила 530 ± 20 тыс. лет (Vokrouhlický и др., 2009). В работе (Vokrouhlický и др., 2024) по состоянию на июнь 2023 г. к семейству Datura отнесено 92 астероида и обращается внимание, что еще два астероида, — 2016 PL51 и 2022 RB57 — наблюдавшихся в одной оппозиции и имеющих неуверенно определенные элементы орбиты, могут входить в семейство. В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Datura не обнаружили. Собственные элементы орбит астероидов семейства Datura приведены в табл. П3 в (Perminov, 2024). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Datura составляют: $K_1 = 0.00389$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00470$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Emilkowalski

Молодое семейство астероидов Emilkowalski расположено в средней части Главного пояса ($a = 2.60$ а. е., $e = 0.15$, $i = 17.75^\circ$). Семейство Emilkowalski было выделено в 2006 г. (Nesvorný, Vokrouhlický, 2006) в виде группы из трех астероидов: (14627) Emilkowalski, (126761) 2002 DW10 и (224559) 2005 WU179. Первоначальная оценка

возраста группы составила 220 ± 30 тыс. лет. В последующих работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020) были обнаружены новые члены этого семейства и состав семейства увеличился до девяти астероидов. Также увеличились и оценки возраста. Моделирование, выполненное в работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020), показывает, что за последние 5 млн лет произошло по меньшей мере два события распада родительского астероида этого семейства, что согласуется со сценарием каскадного разрушения родительского тела. Семейство Emilkowalski является вероятным источником пылевой полосы (Vokrouhlický и др. 2008; Espy и др., 2009; Pravec и др., 2018), наклоненной к эклиптике на 17° и обнаруженной на инфракрасной космической обсерватории IRAS.

В табл. 5 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для одиннадцати кандидатов в члены семейства Emilkowalski. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит девяти известных членов семейства (см. табл. П4 в (Perminov, 2024)). Условию (2) удовлетворяют четыре астероида: 2015 WH29, 2016 CS377, 2017 UY114 и 2022 SA160. Количество членов семейства астероидов Emilkowalski увеличилось до 13 (табл. П4 в (Perminov, 2024)). После включения новых астероидов в состав семейства изменились значения критериев: $K_1 = 0.00050$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00062$ (а. е.)^{1/2}, но кандидатов, удовлетворяющих условию (2) с новыми значениями критериев в табл. 4 нет.

Таблица 5. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Emilkowalski

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00050$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00059$ (а. е.) ^{1/2}			
2006 UQ33	0.00438	0.00456	Нет
2009 UL13	0.00077	0.00088	Нет
2014 WE584	0.00097	0.00113	Нет
2015 WH29	0.00012	0.00062	Да
2016 CS377	0.00021	0.00033	Да
2017 UY114	0.00016	0.00035	Да
2020 UZ20	0.00055	0.00068	Нет
2021 TU55	0.00079	0.00091	Нет
2019 SV55	0.00141	0.00153	Нет
2019 UN69	0.00849	0.00858	Нет
2022 SA160	0.00023	0.00042	Да

Семейство Hobson

Семейство Hobson расположено в средней части Главного пояса ($a = 2.56$ а. е., $e = 0.18$, $i = 4.32^\circ$). Изначально данное семейство было обнаружено Pravec и Vokrouhlický (2009), однако они не были уверены в том, что астероид (18777) Hobson к нему относится. В их работе крупнейшим астероидом семейства был (57738) 2001 UZ160. Rosaev и Plávalová (2016) доказали, что (18777) Hobson относится к семейству. Таким образом, данное семейство содержит два крупных астероида (18777) Hobson и (57738) 2001 UZ160, схожих по размеру. Возраст семейства оценивается в 365 ± 67 тыс. лет (Rosaev, Plávalová, 2018), верхняя граница возраста не превышает 500 тыс. лет (Pravec, Vokrouhlický, 2009). В работе (Pravec и др., 2018) опровергнуто образование семейства путем вращательного деления. В работе (Кузнецов и др., 2020) обнаружен новый, двенадцатый член семейства Hobson – 2017 SQ83, отсутствующий в списке, приведенном в работе (Rosaev, Plávalová, 2018). В работе (Vokrouhlický и др., 2024) опубликован список из 60 астероидов, входящих в семейство Hobson. В этот список включен астероид 2019 NB193, отсутствующий в каталогах Международного центра малых планет (<https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/MPCORB.DAT>), AstDyS и в базе данных малых тел Солнечной системы (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html). В настоящей работе новые кандидаты в члены семейства Hobson обнаружены не были. Мы вычислили собственные элементы орбиты для 59 астероидов семейства Hobson, исключая астероид 2019 NB193 (см. табл. П5 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Hobson составляют: $K_1 = 0.00099$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00140$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Iochroma

Семейство Iochroma расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.44$ а. е., $e = 0.16$, $i = 3.42^\circ$). Семейство Iochroma выделено в работе (Pravec, Vokrouhlický, 2009) как кластер из пяти астероидов в семействе Nysa. В работе (Pravec и др., 2018) подтвержден состав семейства Iochroma из пяти астероидов и даны две оценки возраста семейства: 190^{+200}_{-100} и 140^{+130}_{-70} тыс. лет. Большие полуоси орбит астероидов семейства Iochroma ограничены двумя трехтельными резонансами: 3J-1M-3

с Юпитером и Марсом и 5J-3S-2 с Юпитером и Сатурном (Rosaev, 2022). В табл. 6 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для двух кандидатов в члены семейства Iochroma. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит пяти известных членов семейства (см. табл. П6 в (Perminov, 2024)). Оба кандидата не удовлетворяют условию (2).

Таблица 6. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Iochroma

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00011$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00013$ (а. е.) ^{1/2}			
2016 BG138	0.00012	0.00015	Нет
2016 UT3	0.00018	0.00022	Нет

Семейство Irvine

Семейство Irvine, расположенное во внутренней части Главного пояса ($a = 2.17$ а. е., $e = 0.01$, $i = 5.40^\circ$), обнаружили Pravec и Vokrouhlický (2009). Семейство состоит из четырех астероидов. Оценку возраста семейства 1790_{-350}^{+460} тыс. лет получили Pravec и др. (2018), используя метод сходимости клонов в вековых углах. В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Irvine не обнаружили. Мы вычислили собственные элементы орбиты для четырех астероидов семейства Irvine (см. табл. П7 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Irvine составляют: $K_1 = 0.00064$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00064$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Kar'bos

Семейство Kar'bos расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.25$ а. е., $e = 0.09$, $i = 3.69^\circ$). Семейство Kar'bos было идентифицировано после того, как был обнаружен третий астероид (Pravec и др., 2018), близкий к тесной паре (11842) Kar'bos – (228747) 2002 VN3, обнаруженной, Pravec и Vokrouhlický (2009). Семейство Kar'bos является компактным кластером в более обширном семействе Flora (Pravec и др., 2018). В 2020 г. были обнаружены еще два астероида, входящие в семейство Kar'bos: (349108) 2007 GD18 и (445874) 2012 TS255 (Fatka и др., 2020). Таким образом, к семейству Kar'bos относятся пять астероидов.

В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Kar'bos не обнаружили. Мы нашли собственные элементы орбиты для пяти астероидов семейства Kar'bos (см. табл. П8 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Kar'bos составляют: $K_1 = 0.00042$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00042$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Lucascavin

Семейство Lucascavin расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.28$ а. е., $e = 0.11$, $i = 5.98^\circ$). Семейство Lucascavin было открыто в 2006 г. Nesvorný и Vokrouhlický (2006). Оценки возраста семейства: 300–800 тыс. лет (Nesvorný, Vokrouhlický, 2006) или 500–1000 тыс. лет (Pravec и др., 2018). Семейство состоит всего из трех астероидов и могло образоваться в результате вращательного деления родительского тела (Pravec и др., 2018). Данный сценарий образования предполагает, что в семействе не будет обнаружено большого числа мелких фрагментов (Vokrouhlický и др., 2024). В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Lucascavin не обнаружили. Мы вычислили собственные элементы орбиты для трех астероидов семейства Lucascavin (см. табл. П9 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Lucascavin составляют: $K_1 = 0.000054$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.000061$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Mandragora

Семейство Mandragora расположено во внешней части Главного пояса ($a = 3.04$ а. е., $e = 0.19$, $i = 0.56^\circ$). Семейство Mandragora, включающее восемь астероидов, было выделено в работе (Pravec и др., 2018). В этой же работе сделан вывод о невозможности образования данного семейства путем вращательного деления. В табл. 7 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для одиннадцати кандидатов в члены семейства Mandragora. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит восьми известных членов семейства (см. табл. П10 в (Perminov, 2024)). Условию (2) удовлетворяют орбиты четырех астероидов: (43239) 2000 AK238, (391017) 2005 SX208, (459310) 2012 GZ32, (514734) 2007 BJ41. В результате число известных членов семейства астероидов Mandragora возросло до 12 (табл. П10 в (Perminov, 2024)).

Таблица 7. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Mandragora

Астероид		$L_1,$ (а. е.) ^{1/2}	$L_2,$ (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00054$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00104$ (а. е.) ^{1/2}				
(43239)	2000 AK238	0.00029	0.00081	Да
(204960)	4713 P-L	0.00556	0.00606	Нет
(265395)	2004 TM4	0.00182	0.00230	Нет
(327558)	2006 CE52	0.00187	0.00236	Нет
(373667)	2002 QX88	0.00087	0.00136	Нет
(391017)	2005 SX208	0.00053	0.00100	Да
(412122)	2013 GQ30	0.00180	0.00228	Нет
(459310)	2012 GZ32	0.00018	0.00011	Да
(490713)	2010 RY26	0.02229	0.02275	Нет
(514734)	2007 BJ41	0.00035	0.00083	Да
	2008 HP40	0.00076	0.00125	Нет

Семейство Martes

Семейство Martes расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.38$ а. е., $e = 0.24$, $i = 4.28^\circ$). В 2022 г. в работе (Novaković и др., 2022) был найден астероид, близкий к тесной паре (5026) Martes – 2005 WW113 (Vokrouhlický, Nesvorný, 2008). В работе (Vokrouhlický и др., 2024) были найдены еще три члена семейства. Семейство Martes является тесным кластером внутри крупного семейства Erigone. Семейство очень молодое, по одной из оценок возраст пары (5026) Martes – 2005 WW113 составляет 18 ± 1 тыс. лет (Pravec и др., 2019). В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Martes не обнаружили. Мы нашли собственные элементы орбиты для шести астероидов семейства Martes (см. табл. П11 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Martes составляют: $K_1 = 0.00048$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00065$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Nicandra

Семейство Nicandra расположено в средней части Главного пояса ($a = 2.64$ а. е., $e = 0.24$, $i = 3.60^\circ$). Семейство Nicandra в составе пяти астероидов было выделено в работе (Pravec и др., 2018). В этой же работе получена оценка возраста семейства 870_{-30}^{+170} тыс. лет. В табл. 8 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для семи кандидатов в члены семейства Nicandra. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит пяти известных членов семейства (см. табл. П12

в (Perminov, 2024)). Орбиты всех кандидатов удовлетворяют условию (2). В результате число известных членов семейства астероидов Nicandra возросло до 12 (табл. П12 в (Perminov, 2024)). После включения новых астероидов в состав семейства изменились значения критериев: $K_1 = 0.00031$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00042$ (а. е.)^{1/2}.

Таблица 8. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Nicandra

Астероид	$L_1,$ (а. е.) ^{1/2}	$L_2,$ (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00031$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00031$ (а. е.) ^{1/2}			
2006 ST295	0.000093	0.00037	Да
2007 RC364	0.00028	0.00028	Да
2007 TM252	0.00019	0.000199	Да
2016 SV22	0.00018	0.00018	Да
2020 SN11	0.00012	0.00042	Да
2021 RK120	0.000065	0.00029	Да
2021 RY71	0.00016	0.00039	Да

Семейство Rampo

Семейство Rampo расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.33$ а. е., $e = 0.09$, $i = 6.06^\circ$). Семейство Rampo выделено в работе (Pravec, Vokrouhlický, 2009). В этой же работе была приведена оценка возраста 0.5–1.1 млн лет. В последующих работах (Pravec и др. 2018; Кузнецов и др., 2020; Novaković и др., 2022; Vokrouhlický и др., 2024) были найдены новые члены семейства. В настоящее время семейство Rampo включает 42 астероида (Vokrouhlický и др., 2024). В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Rampo не обнаружили. Мы нашли собственные элементы орбиты для 42 астероидов семейства Rampo (см. табл. П13 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Rampo составляют: $K_1 = 0.00056$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00086$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство Rozek

Семейство Rozek расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 1.94$ а. е., $e = 0.09$, $i = 19.98^\circ$). Vokrouhlický и Nesvorný в 2008 г. обнаружили очень тесную пару (63440) 2001 MD30 – (331933) 2004 TV14 (Vokrouhlický, Nesvorný, 2008). В 2019 г. Pravec сообщил о возможной близости астероида 2008 VS46 к этой паре (Pravec и др.,

2019). Исследования Fatka и др. (2020) подтвердили, что астероиды (63440) 2001 MD30, (331933) 2004 TV14 и 2008 VS46 относятся к одному семейству. В табл. 9 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для двух кандидатов в члены семейства Rozek. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит трех известных членов семейства (см. табл. П14 в (Perminov, 2024)). Орбиты всех кандидатов удовлетворяют условию (2). В результате число известных членов семейства астероидов Rozek возросло до пяти (см. табл. П14 в (Perminov, 2024)). После включения новых астероидов в состав семейства изменились значения критериев: $K_1 = 0.00034$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00061$ (а. е.)^{1/2}.

Таблица 9. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Rozek

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00034$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00035$ (а. е.) ^{1/2}			
2009 WQ62	0.00015	0.00021	Да
2015 MF32	0.00029	0.00061	Да

Семейство Schulhof

Семейство Schulhof расположено в средней части Главного пояса ($a = 2.61$ а. е., $e = 0.12$, $i = 13.53^\circ$). Первоначально был выделен кластер, связанный с астероидом (81337) 2000 GP36 и состоящий из четырех объектов (Pravec, Vokrouhlický, 2009). Позднее было показано, что этот кластер является частью более крупного семейства Schulhof (Vokrouhlický, Nesvorný, 2011), включающего восемь астероидов. В работе (Vokrouhlický и др., 2016) в состав семейства включено 12 астероидов, а его возраст оценивается в 800 ± 200 тыс. лет. В табл. 10 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для 25 кандидатов в члены семейства Schulhof. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит 12 известных членов семейства (см. табл. П15 в (Perminov, 2024)). Орбита только одного астероида 2015 RN272 не удовлетворяет условию (2). В результате число известных членов семейства астероидов Schulhof увеличилось до 36 (табл. П15 в (Perminov, 2024)). После включения новых астероидов в состав семейства изменились значения критериев: $K_1 = 0.00033$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00064$ (а. е.)^{1/2},

но кандидат 2015 RN272 условию (2) с новыми критериями не удовлетворяет.

Таблица 10. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства Schulhof

Астероид		L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.00033$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.00061$ (а. е.) ^{1/2}				
(538410)	2016 DO32	0.00033	0.00059	Да
(583004)	2016 CD342	0.00032	0.00064	Да
(583246)	2016 FB8	0.00026	0.00053	Да
(583459)	2016 GY245	0.00021	0.00047	Да
(633027)	2009 BV194	0.00018	0.00044	Да
(658039)	2017 FC76	0.00017	0.00036	Да
(676281)	2016 EH195	0.00020	0.00045	Да
	2001 BB85	0.00012	0.00039	Да
	2005 EB352	0.00012	0.00039	Да
	2008 FF47	0.00016	0.00034	Да
	2012 FW85	0.00010	0.00032	Да
	2013 EQ37	0.00026	0.00058	Да
	2013 GV46	0.00020	0.00042	Да
	2015 GB17	0.000064	0.00032	Да
	2015 HB205	0.000092	0.00032	Да
	2015 RD144	0.00032	0.00060	Да
	2015 RN272	0.00036	0.00067	Нет
	2016 DE45	0.00029	0.00049	Да
	2016 DY45	0.00025	0.00039	Да
	2016 EF9	0.00021	0.00042	Да
	2016 ES280	0.000093	0.00033	Да
	2016 FT28	0.00023	0.00050	Да
	2018 FK55	0.000086	0.00032	Да
	2019 FD26	0.00014	0.00031	Да
	2022 EU8	0.00026	0.00052	Да

Семейство Wasserburg

Семейство Wasserburg расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 1.95$ а. е., $e = 0.06$, $i = 23.71^\circ$). До открытия семейства Wasserburg, было известно о молодой тесной паре (4765) Wasserburg – 2001 XO105 (Vokrouhlický, Nesvorný, 2008), возраст которой более 90 тыс. лет (Pravec и др., 2010). Последующие исследования показали, что пару сопровождают другие астероиды на очень близких орбитах (Pravec и др., 2019; Novaković и др., 2022; Vokrouhlický и др., 2024). Семейство Wasserburg относят к очень молодым семействам. Семейство Wasserburg могло

возникнуть в результате мощного кратерообразующего события на родительском астероиде (4765) Wasserburg (Vokrouhlický и др., 2024). В настоящее время семейство Wasserburg включает восемь астероидов (Vokrouhlický и др., 2024). В настоящей работе кандидатов в новые члены семейства Wasserburg не обнаружили. Мы нашли собственные элементы орбиты для всех астероидов семейства Wasserburg (см. табл. П16 в (Perminov, 2024)). Оценки значений критериев K_1 и K_2 для семейства Wasserburg составляют: $K_1 = 0.00018$ (а. е.)^{1/2}, $K_2 = 0.00018$ (а. е.)^{1/2}.

Семейство 2002 PY38

Семейство 2002 PY38 расположено во внутренней части Главного пояса ($a = 2.20$ а. е., $e = 0.18$, $i = 0.89^\circ$). Семейство было открыто в 2020 г. и состояло из трех астероидов: (338073) 2002 PY38, (529915) 2012 TZ97, 2016 SQ14 (Кузнецов и др., 2020). Возраст семейства не превышает 100 тыс. лет (Кузнецов и др., 2020). В табл. 11 приведены критерии K_1 и K_2 и максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для одиннадцати кандидатов в члены семейства 2002 PY38. Значения K_1 и K_2 были получены на основе собственных элементов орбит двенадцати известных членов семейства (см. табл. П17 в (Perminov, 2024)). Условию (2) удовлетворяет орбита только одного кандидата 2015 TO83. В результате число известных членов семейства астероидов 2002 PY38 увеличилось до четырех (табл. П17 в (Perminov, 2024)).

Таблица 11. Критерии K_1 и K_2 , максимальные значения L_1 и L_2 метрики ρ_5 для кандидатов в члены семейства 2002 PY38

Астероид	L_1 , (а. е.) ^{1/2}	L_2 , (а. е.) ^{1/2}	Входит в семейство
$K_1 = 0.000078$ (а. е.) ^{1/2} , $K_2 = 0.000078$ (а. е.) ^{1/2}			
2001 KY82	0.000196	0.000196	Нет
2002 FD44	0.000144	0.000144	Нет
2006 UL238	0.000316	0.000333	Нет
2010 RV167	0.000611	0.000643	Нет
2013 VC79	0.000155	0.000156	Нет
2015 RA194	0.000211	0.000280	Нет
2015 TO83	0.000078	0.000078	Да
2019 OU6	0.000552	0.000626	Нет
2019 SL111	0.000716	0.000716	Нет
2021 NV62	0.000603	0.000622	Нет
2022 OQ48	0.000513	0.000517	Нет

Обнаружение новых членов семейств дает возможность обновить данные о диапазонах изменения оскулирующих элементов орбит, приведенных в табл. 1. В табл. 12 для семейств, в которых были найдены новые члены, указаны позиционные оскулирующие элементы орбит главных астероидов семейств и диапазоны их изменения. В дальнейшем сведения об оскулирующих (табл. 12) и собственных элементах орбит (табл. П1–П17 в (Perminov, 2024)) будут использоваться для поиска новых членов молодых семейств.

Таблица 12. Позиционные оскулирующие элементы орбит молодых семейств астероидов с учетом новых членов, обнаруженных в настоящей работе, на эпоху MJD 60200

Семейство астероидов	Количество членов	a_{fam} , а. е.	e_{fam}	i_{fam} , град
Adelaide	81	$2.2450^{+0.0040}_{-0.0012}$	$0.1017^{+0.0028}_{-0.0031}$	$5.9988^{+0.0655}_{-0.0146}$
Brugmansia	4	$2.6209^{+0.0007}_{-0.0015}$	$0.2187^{+0.0034}_{-0.0008}$	$1.6247^{+0.0019}_{-0.0022}$
Emilkowalski	13	$2.6006^{+0.0000}_{-0.0014}$	$0.1503^{+0.0060}_{-0.0041}$	$17.7538^{+0.0168}_{-0.2824}$
Mandragora	12	$3.0393^{+0.0178}_{-0.0086}$	$0.1975^{+0.0485}_{-0.0066}$	$0.5655^{+0.4088}_{-0.0173}$
Nicandra	12	$2.6357^{+0.0007}_{-0.0018}$	$0.2442^{+0.0032}_{-0.0011}$	$3.6050^{+0.4525}_{-0.0866}$
Rozek	5	$1.9384^{+0.0004}_{-0.0010}$	$0.0886^{+0.0003}_{-0.0007}$	$19.9859^{+0.0586}_{-0.0589}$
Schulhof	36	$2.6109^{+0.0010}_{-0.0037}$	$0.1207^{+0.0051}_{-0.0035}$	$13.5351^{+0.2765}_{-0.0990}$
2002 PY38	4	$2.1961^{+0.0009}_{-0.0000}$	$0.1764^{+0.0002}_{-0.0004}$	$0.8889^{+0.0312}_{-0.0000}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в данной работе метод поиска новых членов молодых пар астероидов с использованием метрик Холшевникова для оскулирующих и собственных элементов орбит показал свою работоспособность. Метод позволил найти новые члены в восьми из семнадцати рассмотренных в статье молодых семейств. Подтверждено существование молодого семейства 2002 PY38 и найден новый астероид, входящий в семейство. Диапазоны изменения позиционных оскулирующих элементов орбит (табл. 1 и 12) и оценки критериев K_1 и K_2 (табл. П1–П17 в (Perminov, 2024)) будут востребованы в дальнейшем при поиске новых членов семейств.

Полученные в ходе исследования однородные наборы собственных элементов орбит астероидов семейств будут использоваться в дальнейшем при исследовании строения и динамической структуры семейств, оценке влияния на нее резонансов как средних движений, так и вековых.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00143, <https://rscf.ru/project/24-22-00143/>

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. 2020. 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. 2020. V. 54. № 3. P. 236–252.)
2. Холшевников К.В., Кузнецов Э.Д. Обзор работ по орбитальной эволюции больших планет Солнечной системы // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 4. С. 291–329. (Kholshchevnikov K.V., Kuznetsov E.D. Review of the works on the orbital evolution of solar major planets // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 4. P. 265–300.)
3. 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.
4. Холшевников К.В., Щепалова А.С., Джазматми М.С. Об одном фактор-пространстве кеплеровых орбит // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 7 (65). Вып. 1. С. 165–174.
5. Carruba V., Ramos L.G.M., Spoto F. Spin clusters inside four young asteroid groups // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2020. V. 493. Iss. 2. P. 2556–2567.
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. Espy A.J., Dermott S.F., Kehoe T.J.J., Jayaraman S. Evidence from IRAS for a very young, partially formed dust band // Planet. and Space Sci. 2009. V. 57. Iss. 2. P. 235–242.
8. Fatka P., Pravec P., Vokrouhlický D. Cascade disruptions in asteroid clusters // Icarus. 2020. V. 338. Id. 113554.
9. Hirayama K. Groups of asteroids probably of common origin // Astron. J. 1918. V. 31. P. 185–188.
10. Jacobson S.A., Scheeres D.J. Dynamics of rotationally fissioned asteroids: source of observed small asteroid systems // Icarus. 2011. V. 214. P. 161–178.
11. 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.
12. Knezevic Z., Milani A. Synthetic proper elements for outer Main Belt asteroids // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 2000. V. 78. P. 17–46.
13. Knezevic Z., Lemaître A., Milani A. The determination of asteroid proper elements // Asteroids III / Eds: Bottke W., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 603–612.
14. Knezevic Z., Milani A. Proper element catalogs and asteroid families // Astron. and Astrophys. 2003. V. 403. P. 1165–1173.
15. Nesvorný D., Vokrouhlický D. New candidates for recent asteroid breakups // Astron. J. 2006. V. 132 (5). P. 1950–1958.
16. Nesvorný D., Vokrouhlický D., Bottke W.F. The breakup of a Main-Belt asteroid 450 thousand years ago // Science. 2006. V. 312. Iss. 5779. P. 1490.
17. Novaković B., Radović V. Discovery of four young asteroid families // Res. Notes Am. Astron. Soc. 2019. V. 3. Iss. 7. Id. 105.
18. Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D. Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 2022. V. 134. Iss. 4. Id. 34.
19. Orbfit Consortium. OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. Astrophysics Source Code Library. 2011. arXiv:1106.015.
20. Perminov A. Young families of asteroids. Mendeley Data, V 2. 2024. DOI: 10.17632/hs4rtk9np9.2.
21. Pravec P., Vokrouhlický D. Significance analysis of asteroid pairs // Icarus. 2009. V. 204. Iss. 2. P. 580–588.

22. *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.
23. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheeres D.J., Kušnirák P., Hornoch K., Galád A., Vraštil J., Pray D.P., KruglyYu.N., and 19 co-authors.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 110–126.
24. *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.
25. *Rosaev A., Plávalová E.* Chaos in some young asteroid families. 2016. arXiv:1612.04951.
26. *Rosaev A., Plávalová E.* New members of Datura family // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 140. P. 21–26.
27. *Rosaev A., Plávalová E.* On relative velocity in very young asteroid families // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 135–142.
28. *Rosaev A.* The resonance perturbations of the (39991) Iochroma family // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2022. V. 134. Id. 48.
29. *Vasileva M.A., Kuznetsov E.D.* Age estimation of Brugmansia asteroid family // *Abstract Book. The Thirteenth Moscow Sol. Syst. Symp. (13M-S3)*, 10–14 October 2022. Moscow: IKI RAS, 2022. P. 287–288.
30. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of asteroids probably of a common origin // *Astron. J.* 2008. V. 136. P. 280–290.
31. *Vokrouhlický D., Nesvorný D., Bottke W.F.* Evolution of dust trails into bands // *Astrophys. J.* 2008. V. 672. Iss. 1. P. 696–712.
32. *Vokrouhlický D., Durech J., Michalowski T., Krugly Yu.N., Gaftonyuk N.M., Kryszczyńska A., Colas F., Lecacheux J., Molotov I., Slyusarev I., and 3 co-authors.* Datura family: the 2009 update // *Planets and planetary systems*. 2009. V. 507. P. 495–504.
33. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Half-brothers in the Schulhof family? // *Astron. J.* 2011. V. 142. Id. 26. (8 p.).
34. *Vokrouhlický D., Ďurech J., Pravec P., Kušnirák P., Hornoch K., Vraštil J., Krugly Y.N., Inasaridze R.Y., Ayvasian V., Zhuzhunadze V.* The Schulhof family: solving the age puzzle // *Astron. J.* 2016. V. 151. Id. 56. (12 p.).
35. *Vokrouhlický D., Pravec P., Ďurech J., Bolin B., Jedicke R., Kušnirák P., Galád A., Hornoch K., Kryszczyńska A., Colas F., and 3 co-authors.* The young Datura asteroid family: Spins, shapes and population estimate // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 598. Id. A91 (19 p.).
36. *Vokrouhlický D., Novakovic B., Nesvorný D.* The young Adelaide family: Possible sibling to Datura? // *Astron. and Astrophys.* 2021. V. 649. Id. A1151(5 p.).
37. *Vokrouhlický D., Nesvorný D., Brož M., Bottke W.F.* Debaised population of very young asteroid families // *Astron. and Astrophys.* 2024. V. 681. Id. A23.