

УДК 521.1

ПОСТРОЕНИЕ СЦЕНАРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕМЕЙСТВА EMILKOWALSKI НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ НОМИНАЛЬНЫХ ОРБИТ АСТЕРОИДОВ

© 2025 г. Э. Д. Кузнецов*, В. С. Сафонова, М. А. Васильева, А. С. Перминов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

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

Поступила в редакцию 09.07.2024 г.

После доработки 20.07.2024 г.

Принята к публикации 02.10.2024 г.

В работе построен сценарий формирования молодого семейства астероидов Emilkowalski на основе численного моделирования эволюции номинальных орбит членов семейства. Были рассмотрены различные варианты орбитальной эволюции астероидов в зависимости от величины скорости дрейфа больших полуосей орбит, обусловленного влиянием суточного эффекта Ярковского. С помощью метода анализа сближений узлов и перицентров орбит были получены оценки времени возможного формирования всех возможных пар среди членов семейства. На основе этих оценок был построен сценарий формирования семейства, предполагающий в качестве основного механизма разрушение родительского тела астероида (14627) Emilkowalski. Показано, что часть членов семейства могли образоваться в результате каскадного распада дочерних тел родительского астероида. Построенный сценарий формирования семейства Emilkowalski можно описать как поэтапное разрушение родительского тела астероида (14627) Emilkowalski с элементами каскадного распада некоторых фрагментов.

Ключевые слова: семейство Emilkowalski, сценарий формирования семейства, численное моделирование, схождение узлов и перицентров, каскадный распад, эффект Ярковского, метрики Холшевникова

DOI: 10.31857/S0320930X25020079, EDN: KWHJNS

ВВЕДЕНИЕ

Семейства астероидов представляют собой совокупность объектов, образовавшихся в результате распада общего родительского тела. Впервые скопления астероидов выделил Hirayama (1918) в результате анализа распределения собственных элементов орбит. Можно указать несколько механизмов, приводящих к формированию наблюдаемых семейств астероидов (см., например, Milani и др., 2014): катастрофическое соударение родительского тела и ударника, кратерообразующие соударения крупного родительского тела с относительно небольшими ударниками, вращательный распад под действием YORP-эффекта в модели астероида “груда булыжников”. К механизмам разрушения родительских тел, ведущих к формированию молодых семейств астероидов

(возрастом не более нескольких миллионов лет) в современную эпоху, относят: распад быстро вращающегося родительского тела (Pravec и др., 2010), вторичное деление образующихся при распаде тел (Jacobson, Scheeres, 2011), кратерообразующее столкновение с почти критически вращающимся родительским астероидом (Vokrouhlický и др., 2017), каскадное разрушение родительского тела семейства (Pravec и др., 2018).

Особый интерес с точки зрения изучения процесса формирования представляют молодые семейства, для которых можно попытаться восстановить хронологическую последовательность распада родительского тела. В данной работе мы рассмотрим молодое семейство астероидов Emilkowalski: 1) численным методом на основе известных номинальных орбит исследуем динамическую эволюцию астероидов с учетом

влияния эффекта Ярковского; 2) оценим возраст всех возможных пар среди астероидов семейства и на основе этих оценок; 3) построим базовый сценарий формирования семейства.

МОЛОДОЕ СЕМЕЙСТВО АСТЕРОИДОВ EMILKOWALSKI

Молодое семейство астероидов Emilkowalski расположено в средней части Главного пояса (большая полуось орбиты $a = 2.60$ а. е., эксцентриситет $e = 0.15$, наклон $i = 17.75^\circ$). Семейство Emilkowalski было открыто в 2006 г. (Nesvorný, Vokrouhlický, 2006) в виде группы из трех астероидов на близких гелиоцентрических орбитах: (14627) Emilkowalski, (126761) 2002 DW10, (224559) 2005 WU179. Первая оценка возраста семейства 220 ± 30 тыс. лет (Nesvorný, Vokrouhlický, 2006) показала, что это молодое семейство. Таксономический тип астероида (14627) Emilkowalski оценен в работе (Pravec и др., 2018) на основе фотометрических наблюдений, астероид отнесен к типу D.

В работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020) были обнаружены новые члены семейства, в результате количество астероидов семейства возросло до девяти. В этих работах были получены оценки возраста пар “главный астероид (14627) Emilkowalski – вторичный астероид”. Было показано, что по меньшей мере два события распада родительского астероида этого семейства имели

место за последние 5 млн лет. Это согласуется со сценарием каскадного разрушения родительского тела. Помимо крупных дочерних объектов в результате столкновения образуются объекты меньшего размера, вплоть до частиц размером порядка микрометров. Эти частицы можно наблюдать в виде пылевых полос Солнечной системы. Пылевые полосы молодых семейств астероидов еще не успели рассеять большую часть частиц и, кроме того, в них сохраняется начальное распределение частиц по размерам. Так, обнаруженная инфракрасной космической обсерваторией IRAS пылевая полоса, наклоненная к эклиптике на 17° , является неполной и находится в процессе формирования (Vokrouhlický и др., 2008; Espy и др., 2009). Результаты моделирования показали, что семейство астероидов Emilkowalski является вероятным источником этой пылевой полосы (Vokrouhlický и др., 2008; Espy и др., 2009; Pravec и др., 2018).

В работе (Кузнецов и др., 2025) были обнаружены четыре новых члена семейства Emilkowalski. Таким образом, в настоящее время известно 13 астероидов, входящих в семейство Emilkowalski. В табл. 1 приведены сведения об абсолютной звездной величине H и оскулирующих элементах орбит (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i , долгота восходящего узла Ω , аргумент перигея ω , средняя аномалия M) астероидов семейства Emilkowalski на эпоху MJD60200

Таблица 1. Абсолютные звездные величины и оскулирующие элементы орбит астероидов семейства Emilkowalski на эпоху MJD 60200 по данным каталога AstDyS

Астероид	H , зв. вел.	a , а. е.	e	i , град	ω , град	Ω , град	M , град
(14627) Emilkowalski	13.58	2.6005810	0.1502685	17.75380	41.42001	43.73773	309.81314
(126761) 2002 DW10	15.32	2.6000404	0.1508512	17.71535	40.98723	44.17194	95.392425
(224559) 2005 WU178	16.83	2.5996918	0.1491275	17.72776	41.92697	44.27294	71.884362
(256124) 2006 UK337	16.02	2.6002330	0.1484305	17.77064	42.17836	42.89306	347.07821
(434002) 2000 SM320	16.93	2.6003654	0.1554425	17.53421	34.39551	50.02282	126.77480
(476673) 2008 TN44	17.95	2.5998062	0.1562579	17.47140	33.00600	52.77479	164.31457
(653857) 2014 UV143	17.54	2.6001010	0.1524538	17.55923	34.42791	50.14026	10.426020
(679223) 2018 VB69	17.98	2.5992268	0.1461265	17.75253	43.75385	44.58250	26.038178
2009 VF107	17.73	2.6006012	0.1528810	17.50929	34.30099	52.25885	79.238992
2015 WH29	17.25	2.6005986	0.1487976	17.76756	42.75727	43.70678	313.86425
2016 CS377	18.39	2.6005424	0.1495299	17.64272	38.70598	48.29224	344.39354
2017 UY114	18.62	2.6000197	0.1530059	17.60597	37.52124	48.13280	117.39107
2022 SA160	18.08	2.5999589	0.1526598	17.52017	33.96404	51.84531	47.090917

(13.09.2023) по данным каталога сайта Asteroids Dynamic Site – AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>). Собственные синтетические элементы орбит астероидов семейства Emilkowalski определены в работе (Кузнецов и др., 2025) и доступны в (Perminov, 2024, табл. П4).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДОВ

Численное моделирование движения астероидов семейства Emilkowalski выполнялось с помощью программы Orbit9, входящей в программный комплекс OrbFit (Orbit 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. При учете эффекта Ярковского рассматривалась только суточная компонента, поскольку для небольших (диаметром менее 100 км) астероидов суточная компонента доминирует над сезонной (Vokrouhlický и др., 2015). В качестве начальных были взяты оскулирующие элементы орбит астероидов из каталога AstDyS на эпоху MJD 60200 (см. табл. 1). Интервалы интегрирования составляли 5 и 2 млн лет. Первоначально интегрирование выполнялось на интервале 5 млн лет с шагом выдачи результатов 50 лет. После анализа результатов стало ясно, что возраст большинства пар астероидов не превосходит 1.5 млн лет, поэтому было проведено повторное интегрирование на интервале 2 млн лет с шагом выдачи 20 лет.

Рассматривались различные варианты эволюции: без учета суточного эффекта Ярковского и с учетом этого эффекта. Влияние суточного эффекта Ярковского учитывалось в форме постоянной скорости дрейфа da/dt большой полуоси орбиты a астероида. Скорость дрейфа оценивалась либо по известным физическим и теплофизическими параметрам астероидов, либо использовались параметры, характерные для данного таксономического класса, в предположении, что все астероиды, так же, как и главный астероид семейства (14627) Emilkowalski, относятся к типу D.

Оценка скорости дрейфа большой полуоси da/dt выполнялась с помощью модифицированной версии программы Orbit9, входящей в пакет OrbFit (Fenucci, Novakovic, 2022; <https://github.com/Fenu24/OrbFit>), в которой предусмотрена возможность учета влияния эффекта Ярковского и YORP-эффекта на основе задания

динамических (период осевого вращения и наклон оси вращения), физических (плотность) и теплофизических (теплоемкость, теплопроводность, коэффициенты излучения и поглощения поверхностных слоев) параметров астероида.

Ряд параметров принимались одинаковыми для всех астероидов семейства, основываясь на характерных значениях для астероидов типа D (Ribeiro и др., 2023): плотность $\rho = 1300 \text{ кг м}^{-3}$, теплопроводность $k = 0.5 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, теплоемкость $c = 500 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$, коэффициенты излучения $\alpha = 1$ и поглощения $\beta = 1$. В табл. 2 приведены диаметры D , наклоны осей вращения ϕ , периоды вращения P и оценки скорости дрейфа большой полуоси da/dt для астероидов семейства. Для астероидов (14627) Emilkowalski, (126761) 2002 DW10, (224559) 2005 WU178, (256124) 2006 UK337, (434002) 2000 SM320 имеются оценки диаметров D по данным наблюдений инфракрасной космической обсерватории WISE (Mainzer и др., 2019). Для остальных астероидов диаметры D оценивались по формуле (owell и др., 1989):

$$D = 1329 \text{ км} \times 10^{-H/5} \times p_v^{-1/2} \quad (1)$$

на основе абсолютной звездной величины H из табл. 1 при значении альбедо $p_v = 0.05$, которое близко к характерному альбедо астероидов типа D (Fitzsimmons и др., 1994). Наклон оси вращения по отношению к плоскости орбиты ϕ , т.е. угол между нормалью к плоскости орбиты и осью вращения, для астероидов (14627) Emilkowalski, (126761) 2002 DW10, (224559) 2005 WU178, (256124) 2006 UK337, (434002) 2000 SM320 вычислялся на основе данных о координатах полюса из работ (Martikainen и др., 2021; Mainzer и др., 2019). Для остальных астероидов оценивалась максимальная по модулю скорость дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{\max}$ при значении $\phi = 0^\circ$. В дальнейшем при моделировании динамической эволюции для этих астероидов рассматривались три варианта: 1) $da/dt = |da/dt|_{\max}$ при $\phi = 0^\circ$; 2) $da/dt = 0$ (а. е.) (млн лет) $^{-1}$ при $\phi = 90^\circ$; 3) $da/dt = -|da/dt|_{\max}$ при $\phi = 180^\circ$. Оценка периода осевого вращения имеется только для астероида (14627) Emilkowalski. Период равен $P = 11.130010 \pm 0.0000072$ ч (Martikainen и др., 2021). Для остальных астероидов при оценке скорости дрейфа большой полуоси значение периода принималось равным $P = 8$ ч. Сравнительно большой период вращения был выбран вследствие того, что оси вращения астероидов (126761) 2002 DW10, (224559) 2005 WU178,

(256124) 2006 UK337, (434002) 2000 SM320 (см. табл. 2) ориентированы близко к плоскости орбиты, что может свидетельствовать об относительно невысокой угловой скорости вращения.

Возраст пар оценивался с помощью метода, основанного на поиске моментов сближения узлов и перигелиев орбит (синхронное обнуление разностей долгот восходящих узлов $\Delta\Omega = 0$ и аргументов перигелиев $\Delta\omega = 0$) (см., например, Кузнецова и др., 2020). Оценки возраста пар T получены как среднее значение $T = (T_\Omega + T_\omega)/2$ моментов

Таблица 2. Диаметры D , наклоны осей вращения Φ , периоды вращения P и оценки скорости дрейфа большой полуоси da/dt

Астероид	D , м	Φ , град	P , ч	da/dt , 10^{-5} (а. е.) (млн лет) $^{-1}$
(14627) Emilkowalski	7105 ¹⁾	36.8 ²⁾	11.13001 ³⁾	2.67
(126761) 2002 DW10	2287 ¹⁾	85.9 ⁴⁾	8 ⁷⁾	3.54
(224559) 2005 WU178	1795 ¹⁾	85.7 ⁴⁾	8 ⁷⁾	4.46
(256124) 2006 UK337	2852 ¹⁾	94.0 ⁴⁾	8 ⁷⁾	-4.06
(434002) 2000 SM320	1889 ¹⁾	90.4 ⁴⁾	8 ⁷⁾	-5.34
(476673) 2008 TN44	1500 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	16.4 ⁸⁾
(653857) 2014 UV143	1900 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	13.0 ⁸⁾
(679223) 2018 VB69	1500 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	16.5 ⁸⁾
2009 VF107	1700 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	14.5 ⁸⁾
2015 WH29	2200 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	11.2 ⁸⁾
2016 CS377	1400 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	17.6 ⁸⁾
2017 UY114	1200 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	20.6 ⁸⁾
2022 SA160	1500 ⁵⁾	0 ⁶⁾	8 ⁷⁾	16.4 ⁸⁾

Примечания: 1) по данным из (Mainzer и др., 2019); 2) по данным из (Martikainen и др., 2021); 3) по данным из (Martikainen и др., 2021); 4) по данным из (Mainzer и др., 2019); 5) вычислено по формуле (1); 6) значение выбрано для получения максимальной по модулю оценки скорости дрейфа большой полуоси; 7) значение периода, использованное при получении оценки скорости дрейфа большой полуоси; 8) оценка максимального по модулю значения скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{max}$.

обнуления разностей долгот восходящих узлов T_Ω и аргументов перигелиев T_ω . В дальнейшем использовались оценки, для которых относительная разность моментов $\delta T = (T_\Omega - T_\omega)/T < 0.1$, что обеспечивает необходимую для получения оценок возраста близость моментов обнуления разностей долгот восходящих узлов и аргументов перигелиев. В том случае, когда для астероида рассматривалось несколько вариантов эволюции с разными значениями скорости дрейфа большой полуоси орбиты, оценивался интервал возможных возрастов пары.

При построении сценария формирования семейства в дополнение к оценкам моментов и интервалов времени, соответствующих сближениям узлов и перигелиев орбит при разных скоростях дрейфа больших полуосей орбит, были получены оценки значений метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 (Kholshevnikov и др., 2016; Холшевников, Щепалова, 2018; Холшевников и др., 2020; 2021) и вычислены их разности $\rho_2 - \rho_5$. Метрика ρ_2 определена в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит a, e, i, Ω, ω (положение тела на орбите не учитывается). Метрика ρ_5 определена в фактор-пространстве позиционных элементов a, e, i (при всех возможных ориентациях плоскостей орбит и линий апсид). Поскольку значения метрик ρ_2 и ρ_5 между орбитами астероидов молодого семейства малы по определению, малое, порядка сравниваемых величин ρ_2 и ρ_5 , значение разности $\rho_2 - \rho_5$ является необходимым условием молодости пары (Кузнецова и др., 2020). При анализе возрастов пар будем учитывать, что с ростом возраста пары разность $\rho_2 - \rho_5$ в среднем увеличивается. При вычислении метрик использовались оскулирующие элементы орбит на эпоху MJD 60200.

СЦЕНАРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СЕМЕЙСТВА EMILKOWALSKI

Сценарий формирования семейства Emilkowalski был построен на основе совместного анализа моментов сближения узлов и перигелиев орбит и значений метрик Холшевникова. Построение сценария было разделено на три этапа. На первом анализировались моменты одновременного сближения узлов и перигелиев орбит для случаев сближения орбит астероидов с орбитой главного астероида семейства (14627) Emilkowalski. В результате были выделены группы астероидов, соответствующие последовательности событий разрушения родительского тела. На этом этапе из рассмотрения были исключены

астероиды, орбиты которых не сближаются с орбитой (14627) Emilkowalski. На втором этапе был выполнен анализ близости отобранных пар орбит на основе оценок значений метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 , а также их разности $\rho_2 - \rho_5$. При этом предполагалось, что значения метрик и их разница для последующего события меньше, чем для предыдущего. На третьем этапе проводился анализ возможности образования членов семейства в результате каскадного деления фрагментов родительского тела семейства.

В табл. 3 для пар, включающих главный астероид семейства (14627) Emilkowalski, приведены значения метрик ρ_2 и ρ_5 , разности $\rho_2 - \rho_5$, а также диапазоны оценок возраста, полученные методом поиска одновременных сближений узлов и перигелиев орбит для различных скоростей дрейфа большой полуоси, и оценка возраста на основе эволюции номинальных орбит без учета эффекта Ярковского. Обратим внимание, что первым астероидом пары является фрагмент родительского тела, а вторым – образовавшийся от него дочерний фрагмент.

Первый этап. Анализ моментов одновременного сближения узлов и перигелиев орбит позволил выделить четыре группы последовательных событий (табл. 3), когда орбиты фрагментов сходились с астероидом (14627) Emilkowalski:

- в пределах 1010–1450 и 1100–1300 тыс. лет назад могли образоваться (476673) 2008 TN44 и 2017 UY114 соответственно;

- приблизительно 830–980 и 890–1120 тыс. лет назад могли образоваться 2009 VF107 и 2016 CS377 соответственно;

- в интервалах 720–870 и 750–960 тыс. лет назад могли образоваться 2022 SA160 и (653857) 2014 UV143 соответственно;

- около 300–330 и 550 тыс. лет назад могли образоваться (256124) 2006 UK337 и (224559) 2005 WU178 соответственно.

Не были обнаружены моменты одновременного сближения узлов и перигелиев между орбитой главного астероида семейства (14627) Emilkowalski и орбитами астероидов (126761) 2002 DW10, (434002) 2000 SM320, (679223) 2018 VB69 и 2015 WH29. Это может говорить о том, что перечисленные астероиды образовались в результате вторичного деления фрагментов, отделенных от (14627) Emilkowalski.

Второй этап. Выполнен анализ близости орбит на основе оценок значений метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 , а также их разности $\rho_2 - \rho_5$. Среди пар, отнесенных к первой группе событий формирования, выделяется пара 14627–476673, для которой значения метрик в два и более раз превышают соответствующие значения для пары

Таблица 3. Значения метрик Холшевникова и оценки возраста пар, содержащих главный астероид семейства (14627) Emilkowalski (полужирным шрифтом выделены астероиды, образовавшиеся в процессе дробления (14627) Emilkowalski)

Пара (родительское тело – дочернее тело)	Возраст, тыс. лет	$\rho_2, (\text{a.e.})^{1/2}$	$\rho_5, (\text{a.e.})^{1/2}$	$\rho_2 - \rho_5, (\text{a.e.})^{1/2}$
1-я группа событий				
14627 – 476673	1010–1450	0.072	0.012	0.060
14627 – 2017 UY114	1100–1300	0.034	0.006	0.028
2-я группа событий				
14627 – 2009 VF107	830–980	0.061	0.008	0.053
14627 – 2016 CS377	890–1120	0.025	0.003	0.021
3-я группа событий				
14627 – 2022 SA160	720–870	0.064	0.008	0.056
14627 – 653857	750–960	0.060	0.006	0.053
4-я группа событий				
14627 – 256124	300–330	0.007	0.003	0.004
14627 – 224559	550	0.006	0.002	0.004

14627 – 2017 UY114 (табл. 3). Различия в значениях метрик могут указывать на то, что родительское тело только одного из двух астероидов 476673 или 2017 UY114 могло образоваться от родительского тела астероида 14627. Предполагая, что орбиты пар, образовавшихся раньше, сильнее разошлись к настоящему времени и, следовательно, имеют большие значения метрик, принимаем, что первым от (14627) Emilkowalski отделился астероид (476673) 2008 TN44, а астероид 2017 UY114, вероятно, мог образоваться от другого фрагмента родительского тела семейства.

Для пар, отнесенных ко второй группе событий формирования, значения метрик для пары 14627 – 2016 CS377 в несколько раз меньше соответствующих значений для пары 14627 – 2009 VF107 (табл. 3). Примем, что вторая группа событий привела к образованию родительского тела астероида 2009 VF107. Данный выбор основан на условии, что значения метрик в среднем увеличиваются или, по крайней мере, не уменьшаются с ростом возраста пары, так как при отсутствии или слабом влиянии эффекта Ярковского метрика ρ_5 будет изменяться слабо.

В третьей группе событий формирования могли образоваться астероид (653857) 2014 UV143 и родительское тело астероида 2022 SA160 (табл. 3).

В четвертой группе событий формирования могли образоваться астероиды (224559) 2005 WU178 и (256124) 2006 UK337.

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе дробления родительского

тела главного астероида семейства (14627) Emilkowalski могли образоваться четыре астероида: 224559, 256124, 476673, 653857 и родительские тела астероидов 2009 VF107 и 2022 SA160. Соответствующие пары выделены в табл. 3 полужирным шрифтом. Оставшиеся шесть астероидов: 126761, 434002, 679223, 2015 WH29, 2016 CS377 и 2017 UY114 образовались в результате вторичного деления фрагментов.

Третий этап. Выполнен анализ возможности происхождения астероидов (126761) 2002 DW10, (434002) 2000 SM320, (679223) 2018 VB69, 2015 WH29, 2016 CS377 и 2017 UY114 в результате вторичного деления фрагментов, образовавшихся в результате дробления родительского тела семейства. Поиск фрагментов – кандидатов на вторичное деление – выполнялся с учетом их ожидаемого возраста. Из рассмотрения исключались пары, в которых ожидаемый возраст пары превышал возраст фрагмента. В табл. 4 даны значения метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 , разности $\rho_2 - \rho_5$ и оценки возраста пар, которые могли образоваться в результате каскадного распада фрагментов родительского тела семейства. Сформировавшиеся астероиды выделены полужирным шрифтом, родительские тела даны светлым шрифтом.

Можно выделить несколько событий каскадного распада родительского тела астероида (476673) 2008 TN44, приведшего к формированию астероидов (126761) 2002 DW10, (679223) 2018 VB69, (434002) 2000 SM320 и 2017 UY114 (см. табл. 4).

Таблица 4. Значения метрик Холшевникова и оценки возраста пар, которые могли образоваться в результате каскадного распада фрагментов родительского тела семейства (родительские тела даны светлым шрифтом, образовавшиеся астероиды – полужирным)

Пара	Возраст, тыс. лет	$\rho_2, (\text{a.e.})^{1/2}$	$\rho_5, (\text{a.e.})^{1/2}$	$\rho_2 - \rho_5, (\text{a.e.})^{1/2}$
Последовательное деление родительского тела астероида (476673) 2008 TN44				
476673 – 126761	1430	0.068	0.011	0.057
476673 – 679223	950–1000	0.093	0.018	0.075
476673 – 2017 UY114	660–960	0.039	0.006	0.032
2017 UY114 – 434002	510	0.027	0.004	0.023
Распад родительского тела астероида 2009 VF107				
2009 VF107 – 2015 WH29	710–740	0.072	0.010	0.063
Распад родительского тела астероида 2022 SA160				
2022 SA160 – 2016 CS377	520–740	0.041	0.006	0.035

- Формирование астероида (126761) 2002 DW10 около 1430 тыс. лет назад. Чтобы это событие не противоречило времени образования астероида (476673) 2008 TN44, необходимо предположить, что первое деление родительского тела семейства произошло 1430–1450 тыс. лет назад.
- Формирование астероида (679223) 2018 VB69 в интервале 950–1000 тыс. лет назад.
- Отделение от астероида (476673) 2008 TN44 родительского тела астероида 2017 UY114 приблизительно 660–960 тыс. лет назад.
- Формирование астероидов (434002) 2000 SM320 и 2017 UY114 около 510 тыс. лет назад.

Значения метрик Холшевникова соответствуют оценкам возрастов формирования пар, увеличиваясь с ростом возраста. Для события формирования астероида (126761) 2002 DW10 около 1430 тыс. лет назад метрики Холшевникова меньше, чем для формирования астероида (679223) 2018 VB69 в интервале 950–1000 тыс. лет

назад. Это может быть связано с тем, что астероид (126761) 2002 DW10 имеет большой наклон оси вращения к плоскости орбиты $\phi = 85.9^\circ$ (см. табл. 3) и, следовательно, скорость дрейфа большой полуоси, обусловленная влиянием эффекта Ярковского, мала (см. табл. 2).

Астероид 2015 WH29 мог образоваться 710–740 тыс. лет назад в результате распада родительского тела астероида 2009 VF107.

Астероид 2016 CS377 мог сформироваться 520–740 тыс. лет назад в результате деления родительского тела астероида 2022 SA160.

На рис. 1 приведена схема построенного сценария. Сценарий является предварительным. Для уточнения моментов распада астероидов, а возможно, и последовательности этих событий, необходимо провести моделирование вероятностной эволюции и статистическую оценку возраста пар на основе метода анализа низкоскоростных сближений (Кузнецов и др., 2020).

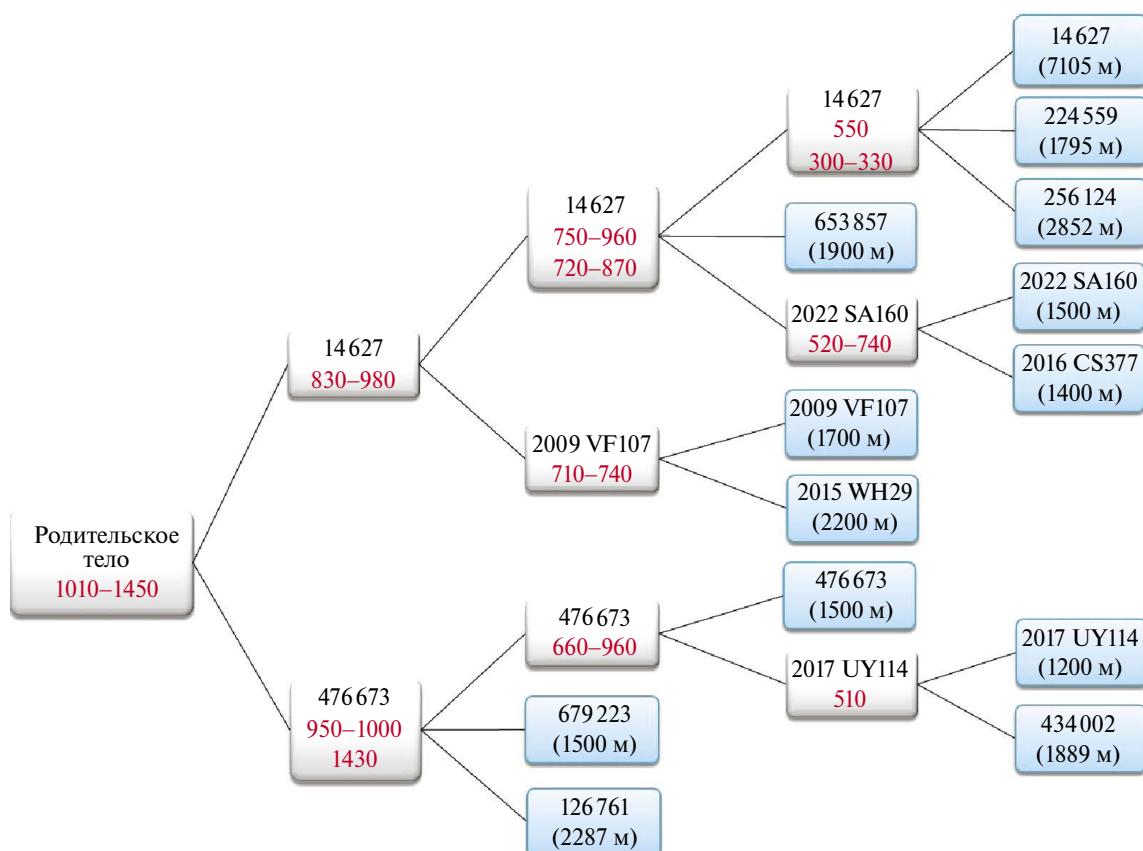


Рис. 1. Сценарий формирования семейства Emilkowalski в результате каскадного деления родительского тела семейства (серые прямоугольники соответствуют родительским телам, голубые – сформировавшимся членам семейства; для родительских тел красным шрифтом указан диапазон возрастов фрагментов в тыс. лет в порядке их расположения на схеме; для членов семейства даны номер или имя для ненумерованных астероидов и размер в метрах).

ОЦЕНКА РАЗМЕРА РОДИТЕЛЬСКОГО ТЕЛА СЕМЕЙСТВА

Оценим диаметр родительского тела как диаметр сферы, эквивалентной объему тела. Для этого оценим объем V_i каждого из n фрагментов, предполагая, что они имеют сферическую форму, на основе значений диаметров D_i , приведенных в табл. 2, и вычислим диаметр D_0 эквивалентной сферы на основе суммарного объема:

$$V_i = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_i}{2}\right)^3, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$D_0 = \left(\frac{6\sum_{i=1}^n V_i}{\pi}\right)^{1/3}. \quad (3)$$

Оценка диаметра эквивалентной сферы родительского тела семейства Emilkowalski составляет $D_0 = 7625$ м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Построенный сценарий соответствует модели каскадного разрушения родительского тела семейства. Основные события представляют собой дробление родительского тела и можно выделить четыре группы таких событий. Большой период осевого вращения астероида (14627) Emilkowalski $P = 11.130010 \pm 0.0000072$ ч (Martikainen и др., 2021) может указывать на то, что дробление родительского тела происходило в результате ударных событий (Fatka и др., 2020). Вывод о каскадном характере формирования семейства согласуется с результатами работ (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020).

В соответствии с построенным сценарием, возраст семейства Emilkowalski составляет около 1.12 млн лет, что в несколько раз меньше оценок, приведенных в работах других авторов: 3.44 млн лет (Pravec и др., 2018) и более 3 млн лет (Fatka и др., 2020). Для сравнения в табл. 5 даны оценки возраста пар, полученные в работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020). Мы считаем, что основная причина различия приведенных в табл. 5 оценок возрастов связана с уточнением элементов орбит астероидов за время, прошедшее после выхода этих статей. Отметим хорошее согласие оценок для наиболее молодой пары: (14627) Emilkowalski – (224559) 2005 WU178. Для пары (14627) Emilkowalski – (256124) 2006 UK337 оценки различаются более чем в 1.5 раза. Для пары (14627) Emilkowalski – (126761) 2002 DW10 в данной работе на интервале 5 млн лет сближений узлов

и перигелиев орбит не обнаружено, в то время как в работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020) даны оценки возраста более 1.3 млн лет. Оценки возраста пар (14627) Emilkowalski – (434002) 2000 SM320, (14627) Emilkowalski – (476673) 2008 TN44, (14627) Emilkowalski – (653857) 2014 UV143, полученные в настоящей работе, существенно меньше, приведенных в работах (Pravec и др., 2018; Fatka и др., 2020). Отметим, что для пары (14627) Emilkowalski – (434002) 2000 SM320 в табл. 5 дана оценка возраста на основе метода сходимости узлов и перигелиев, полученная в настоящем исследовании, несмотря на то, что в построенном сценарии астероид (434002) 2000 SM320 образуется как фрагмент каскадного распада родительского тела.

Отметим, что построенный сценарий формирования семейства Emilkowalski основан на анализе эволюции номинальных орбит астероидов. При учете влияния эффекта Ярковского для астероидов, у которых не известно направление оси вращения, варьировалось значение скорости дрейфа большой полуоси. Для проверки предложенного сценария будет выполнено исследование вероятностной эволюции всех астероидов семейства, в результате которой будут получены оценки моментов низкоскоростных сближений астероидов и достижения минимумов метрики Холшевникова ρ_2 . По этим данным планируется уточнить оценки возраста пар и, при необходимости, скорректировать разработанный сценарий.

Таблица 5. Оценки возраста пар астероидов в семействе Emilkowalski

Пара астероидов	Возраст, тыс. лет		
	Настоящая работа	(Pravec и др., 2018)	(Fatka и др., 2020)
14627 – 126761	–	1384^{+572}_{-346}	1368^{+770}_{-414}
14627 – 224559	500	339^{+2544}_{-110}	311^{+1183}_{-86}
14627 – 256124	300–330	311^{+1183}_{-86}	294^{+1452}_{-77}
14627 – 434002	830–1090	2258^{+462}_{-366}	1991^{+724}_{-385}
14627 – 476673	1010–1450	3447^{+524}_{-898}	3020^{+1232}_{-1340}
14627 – 653857	750–960	3100^{+765}_{-805}	2470^{+1500}_{-750}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа эволюции номинальных орбит астероидов построен сценарий формирования семейства Emilkowalski. Для оценки возраста пар использован метод сходимости узлов и перигелиев орбит совместно с оценками метрик Холшевникова. Построенная модель показывает, что семейство Emilkowalski сформировалось в результате каскадного разрушения родительского тела. Возможно, что семейство существенно моложе, чем считалось ранее. Мы планируем проверить этот вывод на основе результатов исследования вероятностной эволюции членов семейства.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Э.Д., Васильева М.А., Перминов А.С., Сафронова В.С. Поиск новых членов молодых семейств астероидов // Астрон. вестн. 2025. Т. 59. № 1. С. 45–56.
<https://doi.org/10.31857/S0320930X25010041>
(Kuznetsov E.D., Vasileva M.A., Perminov A.S., Safronova V.S. Search for new members of young asteroid families // Sol. Syst. Res. 2025. V. 59. Id. 8. 12 p.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094624601129>
2. Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е., Сафронова В.С., Васильева М.А. Поиск молодых пар астероидов на близких орbitах // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 3. С. 260–277.
<https://doi.org/10.31857/S0320930X2003007X>
(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.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094620030077>
3. Холшевников К.В., Щепалова А.С. О расстояниях между орбитами планет и астероидов // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 3. С. 509–523.
<https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.314>
4. Холшевников К.В., Щепалова А.С., Джазамати М.С. Об одном фактор-пространстве кеплеровых орбит // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 7 (65). Вып. 1. С. 165–174.
<https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.116>
5. Холшевников К.В., Миланов Д.В., Щепалова А.С. Пространство кеплеровых орбит и семейство его фактор-пространств // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8 (66). Вып. 2. С. 359–369.
<https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.215>
6. 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.
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.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.06.011>
8. Fatka P., Pravec P., Vokrouhlický D. Cascade disruptions in asteroid clusters // Icarus. 2020. V. 338. Id. 113554.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113554>
9. Fenucci M., Novakovic B. MERCURY and ORBFIT packages for numerical integration of planetary systems: implementation of the Yarkovsky and YORP effects // Serbian Astron. J. 2022. V. 204. P. 51–63.
<https://doi.org/10.2298/SAJ2204051F>
10. Fitzsimmons A., Dahlgren M., Lagerkvist C.-I., Magnusson P., Williams I. A spectroscopic survey of D-type asteroids // Astron. and Astrophys. 1994. V. 282. P. 634–642.
11. Hirayama K. Groups of asteroids probably of common origin // Astron. J. 1918. V. 31. P. 185–188.
12. Jacobson S.A., Scheeres D.J. Dynamics of rotationally fissioned asteroids: source of observed small asteroid systems // Icarus. 2011. V. 214. P. 161–178.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.009>
13. Kholshevnikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhyan 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.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stw1712>
14. Mainzer A.K., Bauer J.M., Cutri R.M., Grav T., Kramer E.A., Masiero J.R., Sonnett S., Wright E.L. NEOWISE Diameters and Albedos V2.0. NASA Planetary Data System. 2019. Id. 251.
<https://doi.org/10.26033/18S3-2Z54>
15. Martikainen J., Muinonen K., Penttila A., Cellino A., Wang X.-B. Asteroid absolute magnitudes and phase curve parameters from Gaia photometry // Astron. and Astrophys. 2021. V. 649. Id. A68.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039796>
16. Milani A., Cellino A., Knezevic Z., Novakovic B., Spoto F., Paolicchi P. Asteroid families classification:

- exploiting very large data sets // *Icarus*. 2014. V. 239. P. 46–73.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.05.039>
17. *Nesvorný D., Vokrouhlický D.* New candidates for recent asteroid breakups // *Astron. J.* 2006. V. 132 (5). P. 1950–1958.
<https://doi.org/10.1086/507989>
18. *Orbfit Consortium.* OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. Astrophysics Source Code Library. 2011. arXiv:1106.015.
19. *Perminov A.* Young families of asteroids. Mendeley Data, 2024. V. 1.
<https://doi.org/10.17632/hs4rtk9np9.1>
20. *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.
<https://doi.org/10.1038/nature09315>
21. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheeres D.J., Kušnírák P., Hornoch K., Galád A., Vraštil J., Pray D.P., Krugly Yu.N., and 19 co-authors.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 110–126.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.008>
22. *Ribeiro T.M., D'Ambrosio A., Calabuig G.J.D., Athanasopoulos D., Bates H., Riegler C., Gassot O., Gerig S.-B., Gómez-González J.L., Huber N., Setton R., Magalhães T.E.C.* CARINA: A near-Earth D-type asteroid sample return mission // *Acta Astronaut.* 2023. V. 212. P. 213–225.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.035>
23. *Vokrouhlický D., Nesvorný D., Bottke W.F.* Evolution of dust trails into bands // *Astrophys. J.* 2008. V. 672. Iss. 1. P. 696–712.
<https://doi.org/10.1086/523687>
24. *Vokrouhlický D., Bottke W.F., Chesley S.R., Scheeres D.J., Statler T.S.* The Yarkovsky and YORP Effects // *Asteroids IV* / Eds: Michel P., De-Meo F.E., Bottke W.F. 2015. P. 509–531.
https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch027
25. *Vokrouhlický D., Pravec P., Ďurech J., Bolin B., Jedlické R., Kušnírák 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.).
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629670>