

Исследование ретроспективной эволюции наиболее долгоживущих околосолнечных комет

© Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов, А. Л. Толстой

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Исследованы динамические особенности орбит шести околосолнечных комет с наибольшей наблюдательной историей из семейств Марсдена и Крахта: 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6, P/2008 N4. По позиционным наблюдениям, взятым с веб-сайта (MPC, 2023), уточнены их координаты, скорости и трансверсальные составляющие негравитационных ускорений A_2 по модели Марсдена. Для большинства комет величина A_2 не превышала $0.02 \cdot 10^{-8}$ а.е./сут². Исключение составила комета P/1999 J6, что может быть следствием ее фрагментации при прохождении перигелия в 1999 г. Величина СКО представления позиционных наблюдений, полученных космическим аппаратом SOHO, в большинстве случаев оказалась близка 20 угл. сек. дуги.

Целью данной работы является определение возможных моментов разделения исследуемых комет в предположении, что в прошлом кометы являлись частями единого материнского тела.

Орбиты комет были проинтегрированы на 4000 лет назад, и на основании результатов численного интегрирования для всех пар орбит комет были рассчитаны значения критериев близости орбит. Вычислялись три критерия близости орбит: критерий Суатворта и Хокинза, критерий Драммонда, и критерий Холшевникова.

В результате проведенного анализа выдвинуто предположение о возможной фрагментации пары комет 342P и P1999 J6 в 1200 г. Обе кометы имели тесное сближение с Юпитером в этот момент и могли распасться на одном из предшествующих появлений. У пары орбит комет 321P и 322P был выявлен локальный минимум всех трех критериев в 1900 г., что позволяет предположить возможность отделения данных комет друг от друга в этот момент. Проведенные вычисления подтверждают гипотезу о том, что большинство рассматриваемых в работе околосолнечных комет образовалось в результате разрушения протокометы.

Ключевые слова: околосолнечные кометы, 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6, P/2008 N4, динамика комет, критерии близости орбит, метрика Холшевникова.

Контакты для связи: Медведев Юрий Дмитриевич (medvedev@iaaras.ru).

Для цитирования: Медведев Ю. Д., Павлов С. Р., Толстой А. Л. Исследование ретроспективной эволюции наиболее долгоживущих околосолнечных комет // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 69. С. 18–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.18-25>

Retrospective Evolution Study on the Longest-Lived Near-Sun Comets

Yu. D. Medvedev, S. R. Pavlov, A. L. Tolstoy

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The dynamic features of the orbits of the six longest-lived comets from the Marsden and Kracht families 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6, P/2008 N4 were studied. Their coordinates, velocities and transversal components of non-gravitational accelerations A_2 have been improved using positional observations obtained from MPC website (2022.12.25). For most of the comets, the value of A_2 did not exceed $0.02 \cdot 10^{-8}$ au/day². The comet P/1999 J6 was an exception, which may have resulted from its disintegration while passing its perihelion in 1999. The value of the root-mean-square error of positional observations by SOHO spacecraft in most cases reached 25 arcseconds. The equations of motion for 4 thousand years into the past were integrated and the values of D-criteria for all pairs of the orbits were obtained. Three criteria characterizing the similarity of a pair of orbits were calculated: the Southworth and Hawkins, the Drummond, and the Holshevnikov criteria.

The purpose of this work is to determine the possible moments of the comets separation based on the assumption that the comets could have been parts of a single parent body in the past.

As a result of the analysis, it has been suggested that a pair of comets 342P and P1999 J6 may have fragmented in 1200. Both of these comets had a close approach to Jupiter at this time. The calculations confirm the hypothesis that most near-Sun comets were formed as a result of the destruction of a protocomet.

Keywords: near-Sun comets, 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6, P/2008 N4, comet dynamics, D-criteria, Kholshchevnikov metrics.

Contacts: Yuri D. Medvedev (medvedev@iaaras.ru).

For citation: Medvedev Yu. D., Pavlov S. R., Tolstoy A. L. Retrospective evolution study on the longest-lived near-Sun comets // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 69. P. 18–25.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.18-25>

Введение

К околосолнечным кометам относят кометы, перигелийное расстояние которых не превышает 33 радиусов Солнца (R_{\odot}). Среди них выделяют кометы, приближающиеся к Солнцу на расстояния, меньшие предела Роша ($3.45 R_{\odot}$), их называют «царапающими Солнце» (от английского «sungrazers»). Особое название есть у комет, которые уже не наблюдаются после прохождения перигелия из-за их поглощения солнечной плазмой, — это «солнечные ныряльщики» или «sundivers». Кометы с перигелийными расстояниями в пределах от $3.45 R_{\odot}$ до $33 R_{\odot}$ называют «скользящими по Солнцу» — «sunskiters» ([Sekanina, Chodas, 2005](#)). Первой кометой, проходившей на расстоянии всего в 200000 км от Солнца ($\approx 0.3R_{\odot}$), которую удалось обнаружить, была Большая комета 1680 г., наблюдавшаяся с Земли невооруженным глазом. После более чем 160-летнего перерыва, в 19 столетии были открыты еще три околосолнечные кометы. Последующие открытия были спорадическими до момента ввода в декабре 1995 г. космического аппарата SOHO в точку Лагранжа L1 системы Земля — Солнце ([Knight, 2008](#)).

За прошедшие с тех пор 25 лет благодаря наблюдениям, полученным с космической станции SOHO было открыто более 4000 новых околосолнечных комет. Большая часть из них имеет совсем небольшие размеры, порядка нескольких десятков метров, из-за чего они становятся видны лишь вблизи Солнца ([Jenniskens et al., 2012](#)). Поэтому большинство новых открытий околосолнечных комет делается по снимкам с коронографа SOHO. Однако дуга наблюдений для большинства этих комет невелика, и получить их удастся только на интервалах от нескольких часов до нескольких суток. Кроме того, наблюдения SOHO имеют относительно невысокую точность, поэтому для определения орбиты с приемлемой точностью требуется объединить как минимум 3 появления ([Чернетенко, 2020](#); [Emel'yanenko, Naroenkov, 2018](#)).

В начале двухтысячных годов в связи с накоплением базы данных с наблюдениями околосолнечных комет были предприняты попытки упорядочить имеющуюся информацию и по возможности ответить на вопрос о происхождении данного типа комет. Было выделено 4 группы околосолнечных комет со схожими элементами — это семейства Крейца, Марсдена, Крахта и Мейера. Кометы семейства Крейца относят к классу «sungrazers». Более 90 % обнаруживаемых комет принадлежат этому семейству. Испытывая огромные градиенты давления и температуры во время

прохождения перигелия, эти кометы разрушаются, распадаясь на мелкие фрагменты, увеличивая тем самым число вновь открываемых представителей семейства. Они наблюдаются до тех пор, пока размер фрагментов не становится слишком мал. Кометы из других трех семейств имеют перигелийные расстояния от 6 до $12 R_{\odot}$, и их относят к классу «sunskiters». Остальные околосолнечные кометы не отнесены ни к одному из семейств.

К настоящему дню, если говорить о происхождении этих комет, считается, что кометы семейства Крейца представляют собой фрагменты комет C/1965 S1 Ikeya-Seki и C/1882 R1, которые, в свою очередь, были частями общей протокометы, распавшейся вблизи Солнца примерно в начале второго тысячелетия до н. э. ([Marsden, 1967](#)). Семейства комет Марсдена и Крахта, совместно с кометой 96P/Machholz 1, астероидом 196256 (2003 EH1), а также метеорными потоками Ариетиды и Южным дельта-Аквариды, принято считать потомками так называемого «Комплекса Макхгольца». Он являлся единым объектом, постепенно претерпевавшим ряд разрушений, причем семейства Марсдена и Крахта разошлись из единого фрагмента данного комплекса предположительно не позднее 950 г. н. э. ([Knight, 2008](#); [Neslušan et al., 2013](#)).

Целью данной работы является определение возможных моментов разделения исследуемых комет в предположении, что в прошлом кометы являлись частями единого материнского тела, а также сравнение характера изменения критериев близости орбит небесных тел на длительном интервале.

Определение орбит околосолнечных комет

Исследованы динамические особенности нескольких наиболее долгоживущих околосолнечных комет с наибольшим числом наблюдений. Среди них представители семейств Марсдена: кометы 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6 и Крахта: комета P/2008 N4. В среднем у комет имелось от 4 до 6 появлений с учетом осколков, как, например, для кометы P/1999 J6, которая после прохождения перигелия в 1999 г. раскололась на несколько фрагментов, наблюдавшихся на следующем обороте под номерами P/2004 V9 и P/2004 V10, и основной фрагмент которой (P/2004 V9) наблюдался впоследствии ещё на двух оборотах. Основная масса наблюдений была получена с коронографа SOHO, наземные наблюдения имеются лишь для комет 322P и 323P в их последних появлениях, когда предварительные орбиты для них были уже определены с приемлемой точностью.

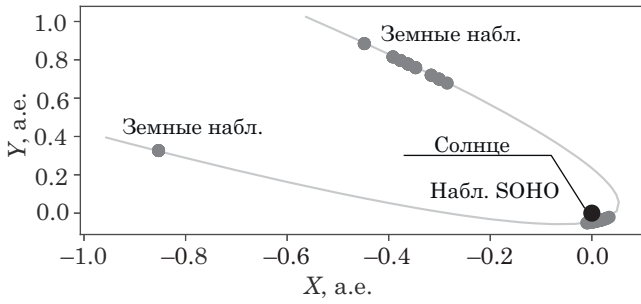


Рис. 1. Распределение наблюдений кометы 323P вдоль орбиты

Наземные наблюдения позволяют дать оценки размеров этих комет, которые не превышают сотен метров при альбедо равном 0.14.

Следует отметить высокую неравномерность наблюдений, получаемых с SOHO, которые сосредоточены в основном на небольших участках орбит в области перигелия. На рис. 1 приведено распределение наблюдений кометы 323P, полученных с наземных обсерваторий и с КА SOHO.

Авторы провели серию улучшений орбит комет по всем доступным позиционным наблюдениям (MPC, 2023). В движении комет учитывались гравитационные возмущения от всех больших планет, Плутона и Луны, негравитационные ускорения по модели Марсдена (A_1, A_2, A_3). Координаты и массы возмущающих планет брались из эфемериды de440 (Park et al., 2021). Уравнения движения в форме Энке интегрировались методом Эверхарта (Everhart, 1974). Уточнялись координаты и скорости на начальную эпоху, а также значения трансверсальной составляющей негравитационных ускорений (НУ) по модели Марсдена (A_2), осталь-

ные составляющие негравитационных ускорений из наблюдений не определялись, поскольку приводили к слишком большим ошибкам данных параметров. Величины трансверсальной составляющей НУ для всех комет оказались весьма незначительными, за исключением кометы P/1999 J6, что может быть связано с процессом распада данной кометы в перигелии.

Мы пробовали также варианты улучшения орбит, когда в число улучшаемых параметров помимо НУ A_2 включалась величина смещения фотоцентра (СФ) кометы относительно ее центра инерции. Компоненты СФ определялись как в орбитальной (по радиус-вектору, трансверсали и нормали), так и в экваториальной (x, y и z) системах координат. Вычисления показали, что наиболее уверенно определяется радиальная компонента СФ ΔR , ее величина вычислялась обратно пропорционально квадрату гелиоцентрического расстояния $\Delta R = \Delta R_0/r^2$, где r — расстояние до Солнца, ΔR_0 — улучшаемый параметр.

В табл. 1 приведены вычисленные элементы на эпоху улучшения, значения негравитационного ускорения A_2 , величины смещения фотоцентра ΔR в перигелии, их ошибки и оценки среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ рассматриваемых комет. В таблицу также включена информация об общем числе наблюдений, количестве появлений, на которых наблюдались кометы, и о количестве появлений, наблюдения которых удалось объединить одной орбитой при улучшении. В этой таблице e — эксцентриситет, a — большая полуось, i — наклон плоскости орбиты, Ω — долгота восходящего узла и ω — аргумент перигелия.

Таблица 1

Значения трансверсальной составляющей A_2

Название комет	e	a , а.е.	i град.	Ω , град.	ω , град.	A_2 ($10^{-10} \frac{\text{а.е.}}{\text{сут}^2}$)	ΔR_0 на 1 а.е., км	σ , угл. сек.	Общее количество наблюдений	Общее количество появлений (вошедших в улучшение)
321P	0.981 ± 0.001	2.426 ± 0.001	19.740 ± 0.011	165.250 ± 0.026	172.440 ± 0.032	-0.017 ± 0.001	—	10.23	91	5 (5)
322P	0.979 ± 0.001	2.516 ± 0.001	12.660 ± 0.002	359.880 ± 0.017	48.680 ± 0.017	0.005 ± 0.001	63.58 ± 5.65	19.15	319	5 (5)
323P	0.985 ± 0.001	2.586 ± 0.001	5.370 ± 0.001	324.230 ± 0.001	353.170 ± 0.001	-0.125 ± 0.005	22.60 ± 4.50	6.20	210	6 (4)
342P	0.982 ± 0.001	3.045 ± 0.001	14.790 ± 0.011	52.100 ± 0.054	50.610 ± 0.057	-1.147 ± 0.006	—	35.60	285	4 (4)
P/1999 J6	0.984 ± 0.001	3.101 ± 0.001	26.610 ± 0.005	81.660 ± 0.019	21.940 ± 0.023	-18.898 ± 0.001	-37.20 ± 4.20	14.70	267	4 (4)
P/2008 N4	0.985 ± 0.001	3.224 ± 0.001	13.58 ± 0.043	50.36 ± 0.120	52.08 ± 0.213	0.249 ± 0.031	-36.64 ± 19.0	20.11	45	3 (3)

Таблица 2

Трансверсальная составляющая НУ A_2 кометы 323P на разных интервалах наблюдений

Интервал	$A_2 \pm \text{ошибка} \left(10^{-10} \frac{\text{а.е.}}{\text{сут}^2}\right)$
2012–2021	-0.219 ± 0.005
2008–2012	-0.068 ± 0.012
1999–2008	-0.063 ± 0.010

Таблица 3

Трансверсальная составляющая НУ A_2 и величина СФ ΔR кометы 323P

Интервал	$A_2 \pm \text{ошибка} \left(10^{-10} \frac{\text{а.е.}}{\text{сут}^2}\right)$	ΔR , км
2012–2021	-0.112 ± 0.005	54.6 ± 9.1
1999–2012	-0.064 ± 0.008	—

Из табл. 1 видно, что σ в большинстве случаев составила $20''$, что указывает на невысокую точность наблюдений SOHO. Уменьшение σ для кометы 323P обусловлено наличием наземных наблюдений, точность которых оказалась примерно в 100 раз лучше SOHO, поэтому наблюдениям SOHO назначался меньший вес. Для кометы 322P точность наземных наблюдений составила $2.6''$. Значения ΔR_0 приведены для гелиоцентрического расстояния 1 а.е., поэтому в перигелии, где были получены наблюдения с SOHO, данную величину следует домножать приблизительно на 300.

Точность орбиты кометы P/2008 N 4 наименьшая, что обусловлено небольшим числом наблюдений и исключительно короткими дугами наблюдений в появлениях этой кометы. Так, в первом появлении в 1996 г. комета наблюдалась в течение 12 ч, во втором в 2002 г. — 19 ч, и в третьем появлении в 2008 г. — 4 ч.

При улучшении орбиты кометы 323P использовались последние на момент написания статьи наблюдения февраля 2021 г., таким образом, для данной кометы имелись наблюдения в 6 появлениях, включая последние наземные наблюдения. Решение с одним набором негравитационных ускорений не позволило объединить наблюдения во всех появлениях. Чтобы включить наблюдения 2004 и 2008 гг., общий интервал наблюдений был разделен на несколько частей, и величина НУ A_2 улучшалась для каждой из частей независимо. Такой подход позволил объединить все 6 появлений кометы и отследить динамику изменения НУ с течением времени, величина σ по сравнению с объединением 4 появлений практически не изменилась. На основании полученных результатов мы сделали вывод о том, что в течение первых 4 появлений абсолютное значение A_2 кометы 323P значительно не менялось, однако в течение последних двух оборотов оно стало активно расти,

что может быть связано с физическими изменениями в структуре ядра кометы. Возможно, во время прохождения перигелия в 2012 г. от кометы отделился небольшой кусок, что дало дополнительный импульс, определенный авторами как увеличение абсолютного значения A_2 .

В табл. 2 приведены результаты описанного улучшения. В колонке «Интервал» указаны годы, на которых действовало данное значение НУ. Мы пробовали применять подобный подход к улучшению орбит других комет, но это не привело к уменьшению их σ .

В табл. 3 приведены результаты улучшения A_2 и величины СФ ΔR кометы 323P в случае, когда интервал наблюдений делился только на две части. В этом варианте значения A_2 определялись с наименьшей ошибкой. Данный вариант улучшения позволил представить наблюдения с СКО $\sigma = 0.72''$.

Анализ критериев близости орбит комет и определение вероятных моментов их отделения друг от друга

Для определения предположительных моментов фрагментации материнского тела, из которого образовывались рассматриваемые кометы, было рассчитано, как со временем меняются критерии близости для всех пар орбит рассматриваемых комет. Вычислялись три критерия близости (D-критерий): критерий Суатворта и Хокинза ([Southworth, Hawkins, 1963](#)), критерий Драммонда ([Drummond, 1980](#)) и критерий Холшевникова ([Kholshchevnikov et al., 2016](#)), единственный из имеющихся на сегодняшний день, представляющий собой метрику в пространстве 5 Кеплеровых элементов орбиты; остальные критерии не являются метриками в полном смысле этого слова, поскольку не удовлетворяют неравенству треугольника.

Графики изменения вычисленных D-критериев приведены на рис. 2–16, где непрерывной линией показано изменение значений критерия Драммонда, пунктирной линией — Суатворта и Хоккинза, штриховой линией — метрики Холшевникова. По оси абсцисс приведено время в годах, где за ноль взято начало нашей эры (1721057.5 JD), а по оси ординат — значения критериев. Критерии близости имеют безразмерную величину и взаимно не нормированы, поэтому при анализе графиков следует обращать внимание на характер изменения величины критерия и не сравнивать критерии по абсолютной величине между собой. Следует отметить, что эти графики отражают картину изменения взаимной схожести орбит в предположении отсутствия явных отклонений в движении комет от модели. Однако если считать, что после распада взаимное расстояние между орбитами может увеличиваться, то именно ближайший минимум к начальной эпохе будет указывать момент распада. Такое допущение логично, если принять во внимание, что время жизни околосолнечных комет на орбите не так велико. Поэтому, анализируя графики, мы искали ближайшие к начальной эпохе минимумы, свидетельствующие о наибольшем сближении орбит комет и о возможной фрагментации в этот период.

На рис. 2 приведены графики изменения D-критериев, вычисленные для орбит комет 321P и 323P. Заметен локальный минимум в окрестности 1900 г. Это означает, что орбиты комет были максимально близки в этой окрестности. Учитывая ошибки их элементов, можно допустить, что кометы распались примерно в это время. Мы вычислили минимальное расстояние, на которое сблизились тела в этот период, и оно составило 0.18 а.е., однако учитывая, что максимальная неопределенность в положении тела вытягивается вдоль её орбиты, мы рассчитали и MOID — минимальное расстояние между орбитами, которое составило уже 0.01 а.е. Менее выраженный минимум заметен на рис. 3, где приведены изменения критериев близости для орбит комет 321P и 322P.

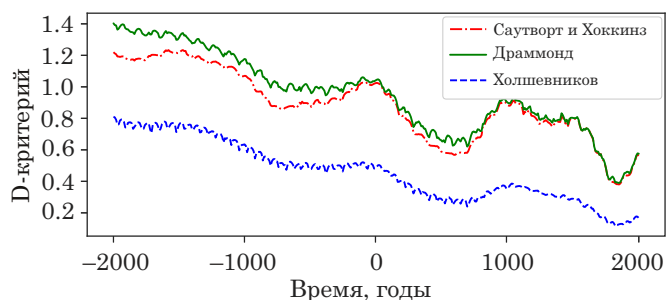


Рис. 2. Величины D-критериев орбит комет 321P–323P

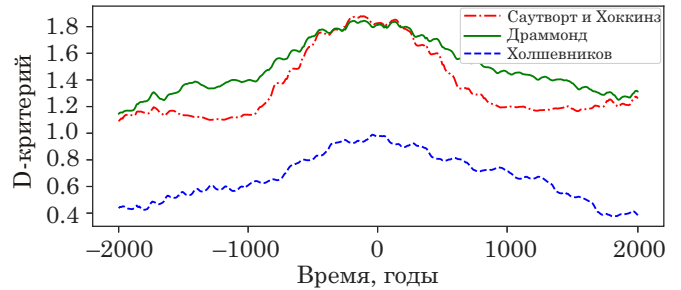


Рис. 3. Величины D-критериев орбит комет 321P–322P

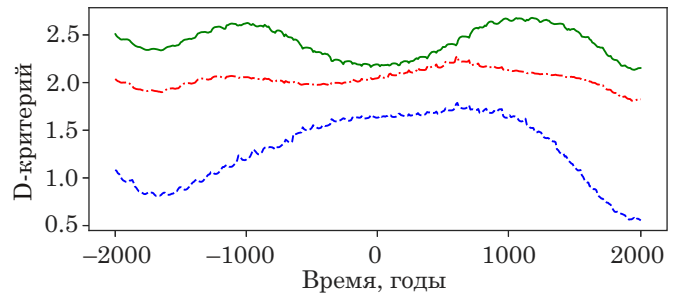


Рис. 4. Величины D-критериев орбит комет 321P–342P

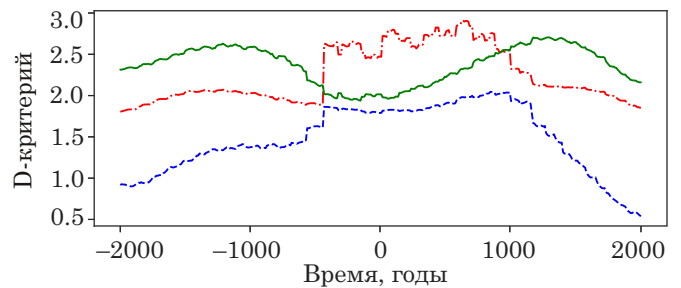


Рис. 5. Величины D-критериев орбит комет 321P–P/1999 J6

Значения критериев близости для орбит комет 321P и 342P, приведенные на рис. 4, увеличиваются по мере удаления от начальной эпохи в прошлое.

На изменение величины близости орбит комет 321P и P/1999 J6 влияет тесное сближение последней с Юпитером в районе 1200 г. н. э. (рис. 5), которое отмечается быстрым и существенным изменением значений критериев.

Аналогичное поведение значений D-критериев орбиты кометы P/1999 J6 можно видеть для пары с орбитами 322P (рис. 6), 323P (рис. 7) и P/2008 N4 (рис. 8).

Однако изменение D-критериев для орбит комет 342P и P/1999 J6 (рис. 9) — иное. Обе эти кометы имели приблизительно в 1200 г. тесное сближение с Юпитером. Приведем полученные нами элементы орбит данных комет на 1 февраля 1200 г. Для кометы 342P: $a = 3.08$ а.е., $e = 0.84$, $i = 70^\circ$, $\Omega = 99^\circ$, $\omega = 15^\circ$. Для кометы P/1999 J6: $a = 3.17$ а.е., $e = 0.80$, $i = 73^\circ$, $\Omega = 98^\circ$, $\omega = 14^\circ$. До этого они двигались по орбитам с большими полуосями,

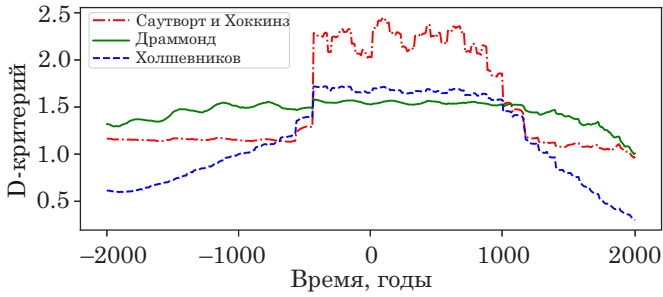


Рис. 6. Величины D-критериев орбит комет 322P-P/1999 J6

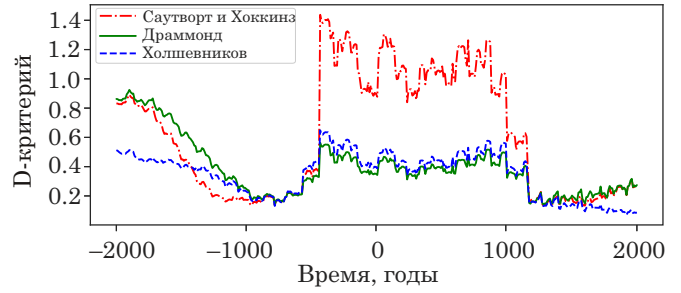


Рис. 9. Величины D-критериев орбит комет 342P-P/1999 J6

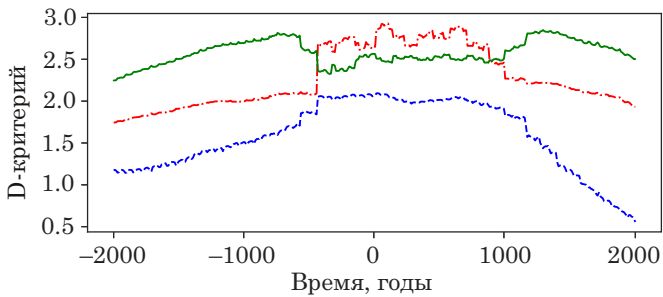


Рис. 7. Величины D-критериев орбит комет 323P-P/1999 J6

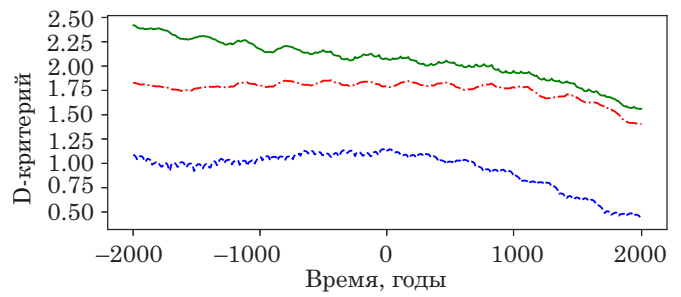


Рис. 10. Величины D-критериев орбит комет 322P-323P

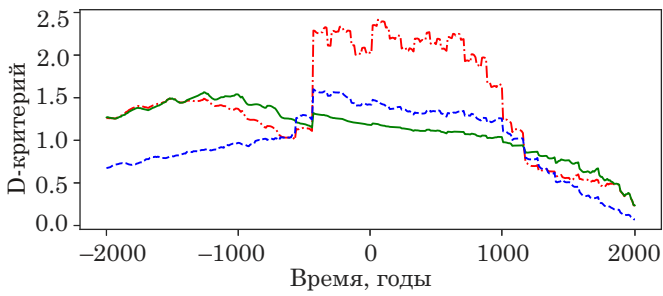


Рис. 8. Величины D-критериев орбит комет P/2008 N4-P/1999 J6

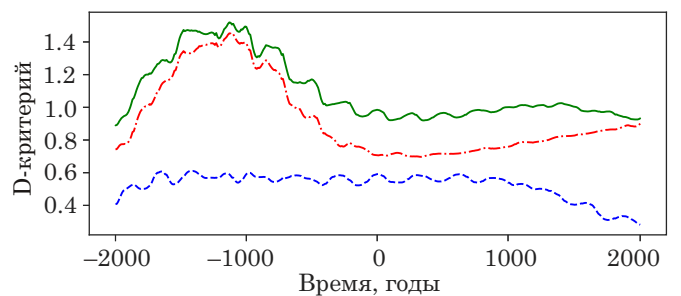


Рис. 11. Величины D-критериев орбит комет 322P-P/2008 N4

близкими к 3.5 а.е., эксцентриситетами ≈ 0.5 и наклонениями около 70° . Все три критерия имеют минимум в момент сближения этих комет с Юпитером, на основании чего можно предположить, что они отделились друг от друга в это время. Дальнейшее ретроспективное рассмотрение динамики изменения критериев после сближения комет с Юпитером не имеет смысла, поскольку вычисленные нами орбиты могут значительно отличаться от истинных, что связано с высокой степенью чувствительности орбиты от начальных ошибок в параметрах орбиты во время сближений с большими планетами.

В изменении D-критериев для орбит комет 322P и 323P (рис. 10), 322P и P/2008 N4 (рис. 11), а также 323P и 342P (рис. 12) трудно выделить выраженные минимумы, свидетельствующие об относительной близости орбит. В среднем с течением времени значения критериев либо увеличиваются,

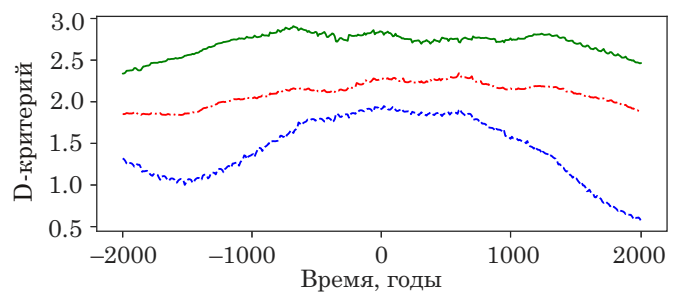


Рис. 12. Величины D-критериев орбит комет 323P-342P

либо сохраняются на исходном уровне, что не дает возможности сделать каких-либо выводов о моментах их разделения.

Значения D-критериев пары орбит 322P и 342P (рис. 13) растут по мере удаления от момента начальной эпохи. Минимумы в районе 1500 г. до н. э. не столь существенны и далеки от начальной

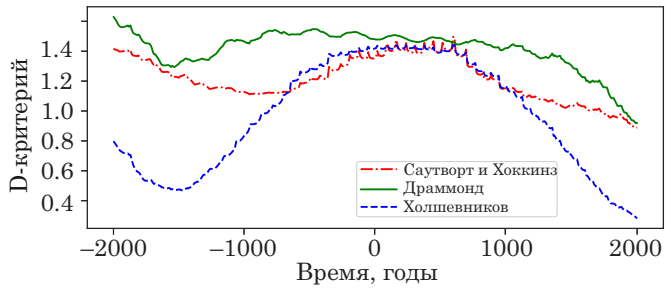


Рис. 13. Величины D-критериев орбит комет 322P–342P

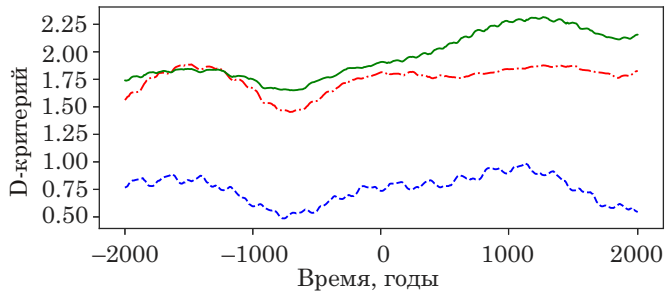


Рис. 14. Величины D-критериев орбит комет 321P–P/2008 N4

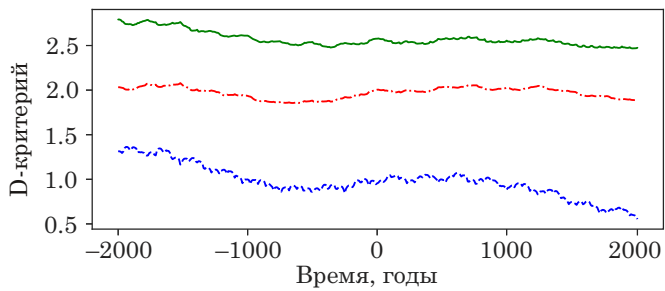


Рис. 15. Величины D-критериев орбит комет 323P–P/2008 N4

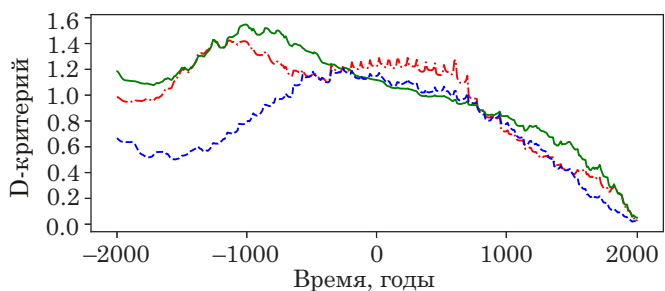


Рис. 16. Величины D-критериев орбит комет 342P–P/2008 N4

эпохи элементов рассматриваемых комет, чтобы принимать их во внимание.

Отсутствие выраженных минимумов в значениях D-критериев для пар орбит с кометой P/2008 N4, приведенных на рис. 14–16, говорит о слабом средстве последней с другим рассматриваемыми кометами и подтверждает тот факт, что она принадлежит иному, нежели остальные кометы, семейству.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования мы уточнили координаты, скорости и трансверсальные составляющие негравитационных ускорений A_2 шести околосолнечных комет, представителей семейств Марсдена и Крахта, причем нам не известны источники, в которых удалось бы объединить единой орбитой все появления кометы 323P, и что было проделано нами с использованием нескольких наборов НУ. Это позволило проследить изменения величины ее НУ со временем. Отмечается более чем 3-кратное увеличение A_2 после 2012 г., что может быть связано с физическими изменениями в структуре ядра кометы. Величина среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ в большинстве случаев достигала 20 угл. сек. Величины НУ A_2 большинства комет не превышали $0.2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{а.е.}}{\text{сут}^2}$.

Мы проинтегрировали уравнения движения исследуемых комет на 4000 лет назад, попарно рассчитали для них значения критериев близости орбит и проанализировали динамику их изменений на данном интервале. Анализ изменения величин критериев со временем показывает, что поведение всех трех критериев сходно для большинства пар комет, за исключением тех, что имеют тесные сближения с Юпитером. Предполагая, что после разделения орбиты комет удалятся друг от друга в фазовом пространстве кеплеровых элементов, мы искали ближайшие к начальной эпохе минимумы критериев близости. В результате проведенного анализа выдвинуто предположение о возможной фрагментации пары комет 342P и P/1999 J6 из общего обломка «Комплекса Макхгольца» приблизительно в 1200 г.

Отмечается, что орбиты комет 321P и 323P особо близки в окрестности 1900 г., что позволяет предположить возможность отделения данных комет друг от друга в этот момент. Чуть менее выраженный минимум критериев близости имеется для орбит комет 321P и 322P практически в тот же период времени. Эти результаты могут служить подтверждением гипотезы о том, что большинство рассматриваемых околосолнечных комет являются осколками распавшейся в предшествующие эпохи протокометы.

Литература

Чернетенко Ю. А. Негравитационные эффекты в орбитальном движении нескольких околосолнечных комет // Труды ИПА РАН. 2020. С. 67–73.

MPC. IAU Minor Planet Center [Электронный ресурс]. URL: <https://minorplanetcenter.net/>. (Дата обращения 13.03.2024).

Drummond J. D. On the meteor/comet orbital discriminant D. // Southwest regional conference for astronomy and astrophysics, 5 / ed. by Gott P. F., Riherd P. S. 1980. Vol. 5. P. 83–86.

Emel'yanenko V. V., Naroenkov S. A. Determination of non-gravitational effects in the motion of near-sun objects 321P, 322P, 323P, and 342P // *Solar System Research*. 2018. Vol. 52, no. 1. P. 64–68.

Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celestial Mechanics*. 1974. Vol. 10, no. 1. P. 35–55.

Jenniskens P., Duckworth H., Grigsby B. Daytime Arietids and Marsden Sunskirters (ARI, IAU #171) // *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. 2012. Vol. 40, no. 3. P. 98–100.

Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin. 2016. Vol. 462, no. 2. P. 2275–2283.

Knight M. M. Studies of SOHO comets: PhD thesis. University of Maryland, College Park, 2008.

Marsden B. G. The sungrazing comet group. 1967. Vol. 72. P. 1170.

Neslušan L., Kaňuchová Z., Tomko D. The meteor-shower complex of 96P/Machholz revisited. 2013. Vol. 551. P. A87.

Park R. S., Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441. 2021. Vol. 161, no. 3. P. 105.

Sekanina Z., Chodas P. W. Origin of the Marsden and Kracht Groups of Sunskirting Comets. I. Association with Comet 96P/Machholz and Its Interplanetary Complex. 2005. Vol. 161, no. 2. P. 551–586.

Southworth R. B., Hawkins G. S. Statistics of meteor streams // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 1963. Vol. 7. P. 261–285.