

Разделившиеся кометы и обстоятельства разделения четырех комет

Ю. А. Чернетенко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Обстоятельства разделения комет изучаются главным образом по методике, предложенной З. Секаниной. Она состоит в определении методом наименьших квадратов (МНК) даты разделения, компонент скорости и радиальной составляющей негравитационного ускорения фрагмента относительно центрального тела. Методика основывается на позиционных положениях фрагмента относительно ядра кометы. Существуют и другие способы исследования таких тел.

В работе предлагается следующий подход. На полученной орбите основного тела с некоторым шагом выбираются моменты разделения, при этом координаты точки разделения считаются общими также и для фрагмента. Затем компоненты скорости фрагмента и параметры негравитационного ускорения по модели Марседена определяются МНК из позиционных наблюдений фрагмента, что позволяет оценить относительную скорость разделения и угол между вектором этой скорости и направлением на Солнце. Рассмотрены обстоятельства разделения комет 101P, 213P, P/2013 R3, P/2016 J1, выполнено сравнение с результатами других авторов.

Ключевые слова: кометы, разделившиеся кометы, негравитационное ускорение, комета 101P, комета 213P, комета P/2013 R3, комета P/2016 J1.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.51.93-107>

Введение

Разделившиеся кометы (РК) представляют немногочисленную (несколько десятков), но чрезвычайно интересную группу комет. Обзор проблем, связанных с их исследованием, содержится, например в работе [1]. РК наблюдаются как комета с двумя или более компонентами, возникающими из родительского тела и первоначально движущимися по очень близким орбитам. Большинство компонентов РК вскоре разрушается или перестает быть наблюдаемым. В некоторых случаях в течение продолжительного времени существует несколько фрагментов.

Из наблюдений известно два типа РК. Тип А: разделившаяся комета имеет немного (обычно два) компонента. Основной фрагмент остается постоянным, вторичный может быть небольшим, короткоживущим или оставаться наблюдаемым продолжительное время. Размеры вторичного компонента оцениваются в 10–100 м. Тип Б: разделившаяся комета имеет много (более 10) компонентов, которые образуются в результате одной или последовательных фрагментаций. Как правило, фрагменты являются коротко живущими и главный компонент

выделить невозможно. По-видимому, тип Б представляет случаи полного разрушения кометы, и ядро кометы может не сохраниться в результате такого события. Относительная скорость фрагментов вскоре после разделения составляет $0.1-15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, для большинства из них — $0.3-4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В табл. 1 [1] приводятся значения радиальной составляющей относительного негравитационного ускорения и средние скорости разделения для различных групп комет. Их отличие может быть индикатором различных механизмов фрагментации для этих групп.

Представляет интерес изучение РК и, в частности, динамических обстоятельств разделения, для получения информации о внутренней структуре и химическом составе кометных ядер и их эволюции. Изучение этих тел (распределение кометеземалий по размерам, первоначальный химический состав, и даже место их образования) может прояснить сценарий образования солнечной системы.

Таблица 1

Относительное ускорение фрагментов и скорости разделения [1] для различных групп комет; значения A_1 вычислены в данной работе

	Новые кометы	Долгопериодические кометы	Короткопериодические кометы
Ускорение (10^{-5} притяжения Солнца)	86 ± 134	41 ± 43	49 ± 59
Ускорение по модели Марседна — $A_1 \cdot 10^8 \text{ а.е. сут.}^{-2}$	25 ± 40	12 ± 13	14 ± 17
Скорость разделения ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)	1.3 ± 1.3	2.0 ± 1.9	2.7 ± 2.3

В основном обстоятельства разделения изучаются по методике, предложенной в работах З. Секанины [2–5]. З. Секанина и его коллеги успешно применили эту модель для исследования нескольких десятков РК. Эта методика состоит в следующем. Имеются ряды позиционных наблюдений ядра кометы (α_0, δ_0) и фрагмента (α_1, δ_1) . На моменты наблюдений фрагмента образуются разности $(\Delta\alpha, \Delta\delta) = (\alpha_0, \delta_0) - (\alpha_1, \delta_1)$. Значения $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ рассматриваются как измеряемые величины, т. е. правые части условных уравнений. Система условных уравнений дополняется условным уравнением на момент разделения, для которого $(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 0$. Определяемыми параметрами являются момент разделения, три составляющие относительной скорости фрагмента и радиальная составляющая относительного негравитационного ускорения в единицах солнечного гравитационного ускорения. Наличие такого ускорения между этими телами является результатом их различного состава и/или различных масс, хотя оно может и отсутствовать. Предполагается, что это ускорение пропорционально $1/r^2$ (r — гелиоцентрическое расстояние фрагмента). Две другие составляющие ускорения полагаются равными нулю. Таким образом, определяются 5 параметров без уточнения орбитальных элементов кометного ядра и фрагмента.

Однако, этот метод имеет некоторые недостатки. К их числу можно отнести тот факт, что основой являются наблюдения фрагмента относительно кометы, при этом ошибка таких наблюдений увеличивается в $\sqrt{2}$ раз при одинаковой точности наблюдений кометы и фрагмента. Кроме того, рассматривается только радиальная составляющая относительного негравитационного ускорения, что может не соответствовать реальному движению, а возможные изменения орбит в результате тесных сближений тел с большими планетами учесть затруднительно. Этот метод позволяет успешно рассматривать задачу только для одного фрагмента. В случае большего числа фрагментов и/или последовательной их фрагментации возможно множество решений и необходим дополнительный анализ полученных результатов.

Безусловным достоинством этого метода является возможность оценить МНК момент разделения. Здесь необходимо отметить, что оценка момента разделения является достаточно сложной задачей. Как показано в работе [6], интегрирование назад уравнений движения фрагментов не позволяет установить единственный и хорошо определяемый момент разделения их орбит. Это обстоятельство подтверждает и автор настоящей работы, в которой, кроме интегрирования назад, были рассмотрены также возможности определения минимального расстояния между двумя орбитами (MOID).

В работе [7] для определения минимального расстояния между орбитами были рассмотрены 4×10^4 орбит фрагментов кометы P/2016 J1, образованные с учетом ошибок их орбитальных элементов. В результате были получены (с точностью до месяца) две даты возможного разделения.

В настоящей работе предпринята попытка использования позиционных наблюдений для определения значений параметров, характеризующих обстоятельства разделения комет: 101P/Chernykh, 213P/Van Ness, P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS), P/2016 J1 (PANSTARRS).

Метод исследования

Применяемый в настоящей работе подход несколько отличается от предложенного Секаниной и состоит в следующем. На первом этапе уточняются орбиты кометы и фрагмента, если возможно, с учетом негравитационного ускорения. Принятая модель движения описана в работе [8]. Полученная таким образом среднеквадратическая ошибка (СКО) наблюдений фрагмента считается его самым точным значением и используется в дальнейшем как один из аргументов при выборе решения.

Затем на орбите основного тела с некоторым шагом (в работе приняты значения от нескольких дней до 1 месяца) отмечаются предположительные моменты разделения, которым соответствуют определенные значения координат и компонент скорости. Эти последние используются для интегрирования уравнений движения фрагмента и уточнения только его компонент скорости (координаты фиксируются) и составляющих негравитационного ускорения по модели Марсдена [9], если они определяются. По полученному ряду значений СКО фрагмента определяется момент разделения, соответствующий его минимальному значению. При этом учитывается близость минимального значения СКО к полученному при уточнении орбитальных параметров фраг-

мента соответствующему значению СКО. Они не должны различаться значительно. Для момента разделения определяются составляющие относительной скорости фрагмента $V_{\text{отн}}$, (в прямоугольной системе координат), что позволяет определить направление вектора этой скорости относительно направления на Солнце. Здесь необходимо отметить, что на номинальной орбите основного тела рассматривается точка разделения, а не область, определяемая ошибками его элементов орбиты, что, безусловно, вносит некоторую ошибку в получаемые значения. Так как момент разделения является наиболее трудно определяемым параметром, то в качестве начальных значений интервала исследования рассматривалась в первую очередь информация о моментах разделения, полученная другими авторами.

Для понимания причин, приводящих к разделению, полезно определение следующих углов: U_1 — угол между векторами скорости кометы и фрагмента; U_2 — угол между вектором скорости основного тела и вектором изменения скорости; U_3 — угол между кометоцентрическим вектором направления на Солнце и вектором изменения скорости кометы. По значению последнего можно предполагать, какими физическими причинами вызвано разделение.

В работе используются наблюдения комет из базы данных Международного планетного центра (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCAT-OBS/MPCAT-OBS.html>). Для всех рассматриваемых тел уточнены параметры их орбит. В табл. 2 приводится информация о наблюдениях рассмотренных комет: их количество — N, полученные в настоящей работе значения СКО наблюдения основного тела (кометы) и фрагментов — СКО_к и СКО, видимые звездные величины m_1 — интегральная абсолютная звездная величина тела — и m_2 — абсолютная звездная величина центрального тела (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>).

Таблица 2

Информация об исследуемых кометах и их фрагментах

Комета	Интервал наблюдений*	N	СКО _к , "	СКО, "	m_1 , m	m_2 , m
101P/Chernykh	1992.10.25–2007.02.13	573	0.691		9.1	13.9
101P/Chernykh-B	2005.11.30–2006.03.19	102		0.758	13.0	–
213P/Van Ness	2005.08.04–2012.10.23	3195	0.450		11.3	14.7
213P/Van Ness-B	2011.07.12–2011.10.02	133		1.302	7.3	18.2
P/2013 R3	2013.09.15–2014.02.13	337	0.469		6.4	16.0
P/2013 R3-A	2013.10.29–2014.02.13	30		0.238	–	–
P/2013 R3-B	2013.10.29–2014.02.13	30		0.214	–	–
P/2016 J1-A	2016.03.04–2016.06.12	44	0.192		16.5	19.8
P/2016 J1-B	2016.03.17–2016.08.04	26		0.219	16.8	20.6

*Примечание. Здесь и далее дата представлена в формате: год. месяц. число.

Рассмотрены следующие кометы и получены обстоятельства их разделений: комета 101P/Chernykh, комета 213P/Van Ness, комета P/2013 R3 (Catalina–PANSTARRS), комета P/2016 J1 (PANSTARRS).

Комета 101P/ Chernykh

Информация о наблюдениях кометы и фрагмента приводятся в табл. 2. Информация об обстоятельствах разделения получена З. Секаниной [10]: время разделения оценивается как конец 1996 г. — начало 1997 г. с неопределенностью ± 3 месяца; скорость разделения составляет 2.0 ± 0.2 м·с⁻¹; дифференциальное негравитационное ускорение $A_T = (7.5 \pm 5.9) 10^{-5}$ в единицах солнечного гравитационного притяжения.

Результаты варьирования момента разделения представлены на рис. 1, в табл. 3 — следующие данные: дата разделения и гелиоцентрическое расстояние r ; СКО наблюдений фрагмента, орбита которого получена при уточнении только компонент скорости и негравитационных параметров; негравитационные параметры — углы U_1, U_2, U_3 ; модуль вектора относительной скорости фрагмента в момент разделения $V_{отн}$. В табл. 3 приводится также информация, полученная для интервала дат разделения, определенных З. Секаниной [10], которые отмечены значком (*). Приведенное в табл. 3 значение СКО, равное 0.808", близко к значению 0.758" (табл. 2), полученному при уточнении орбиты фрагмента по его наблюдениям.

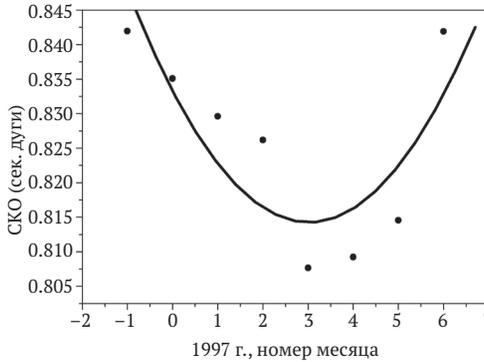


Рис. 1. Значения СКО наблюдений фрагмента в зависимости от времени разделения кометы 101P/Chernykh

Таблица 3

Обстоятельства разделения кометы 101P/ Chernykh

Дата r , а. е.	СКО, "	$A_1 \cdot 10^8$, а. е. · сут. ⁻²	U_1	U_2	U_3	$V_{отн}$, м·с ⁻¹
			°			
1997.03.01 R = 8.74	0.808	46.7 ± 4.9	0.010	131	24	1.66 ± 0.02
1996.10.01* R = 8.49	0.850	50.6 ± 5.1	0.007	140	28	1.45 ± 0.02
1997.04.01* R = 8.78	0.809	46.1 ± 4.9	0.011	130	24	1.70 ± 0.02
Sekanina, 2006 [10]		$\Delta A_T = (7.5 \pm 5.9) 10^{-5}$ $\Delta A_1 = 2.22 \pm 1.75$				2.0 ± 0.2

Полученные оценки близки к результатам З. Секанины [11], но ошибки $V_{\text{отн}}$ и негравитационного параметра примерно на порядок меньше, чем в этой работе, в частности, за счет достаточного количества наблюдений и кометы, и ее фрагмента, которые позволили уверенно определить орбиты этих тел. Первое и третье решения близки, и можно считать, что разделение кометы произошло вблизи рассмотренных дат. Сравнение полученных значений $V_{\text{отн}}$ показывает, что приближение момента разделения к наблюдениям фрагмента приводит к увеличению скорости разделения, что вполне логично.

Для всех рассмотренных вариантов вектор относительной скорости фрагмента направлен в сторону Солнца ($U_3 < 90^\circ$). Это может говорить о том, что разделение вызвано процессами, связанными с нагревом обращенной к Солнцу части поверхности ядра.

Комета 213P/Van Ness

Данные о наблюдениях этой кометы и фрагмента В (наблюдались и другие фрагменты, которые здесь не рассматриваются) приводятся в табл. 2. В работе [11] автор приводит данные о предполагаемом времени отделения фрагмента — $2005.07.24 \pm 40$ сут. Как возможный вариант, указывается также дата $2005.09.09$. При этом относительная скорость разделения составляет 0.3 ± 0.1 м·с⁻¹, а относительное ускорение — $(2.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$ солнечного гравитационного ускорения.

Полученная нами с учетом негравитационного ускорения ($A_1 = +2.42 \pm 0.04$, $A_2 = +1.00 \pm 0.02$, $A_3 = -0.41 \pm 0.01$) орбита кометы 213P рассматривалась в качестве опорной для варьирования времени разделения (рис. 2). Рассмотрены варианты с учетом негравитационного ускорения фрагмента и без него. Оба варианта дают время разделения вблизи $2005.09.01$. Включение в число определяемых параметров A_1 приводит к незначительному, но все же увеличению значения СКО. С другой стороны, рис. 2 показывает, что значения СКО с учетом негравитационного ускорения изменяются со временем более регулярно по сравнению с решениями без такого учета. Интересно отметить также, что, начиная с момента разделения, СКО практически не изменяются (рис. 2).

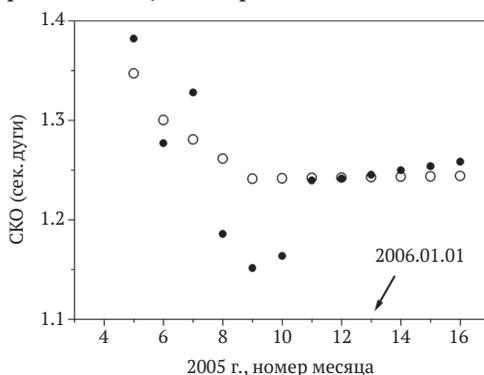


Рис. 2. Значения СКО наблюдений фрагмента в зависимости от времени разделения кометы 213P: светлые кружки — с учетом негравитационного ускорения фрагмента В, темные — без учета этого ускорения

Обстоятельства отделения фрагмента В от кометы 213P

Дата r, а. е.	СКО, "	A_1 10 ⁸ , а. е.·сут ⁻²	U_1	U_2	U_3	$V_{отп}$, м·с ⁻¹
			°			
2005.09.01 R = 2.55	1.152	–	0.006	81	26	2.08 ± 0.21
2005.09.01 R = 2.55	1.241	1.53 ± 0.54	0.004	79	29	1.61 ± 0.27
2005.07.24* R = 2.42	1.282	3.03 ± 0.47	0.005	81	27	1.79 ± 0.33
Sekanina, 2011 [11]		$\Delta A_r = (2.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$ $\Delta A_1 = 0.65 \pm 0.03$				0.3 ± 0.1

В табл. 4 приводятся результаты для этой даты и для даты 2005.07.24 (со значком *), полученной З. Секаниной [11]. Суммируя результаты рис. 2 и табл. 4, можно сказать, что решение 2 является наиболее предпочтительным. Видно также, что включение в решение негравитационного ускорения приводит к уменьшению относительной скорости разделения. Так как для основного тела и фрагмента нами получены значения A_1 , можно сравнить их изменение с результатом работы [11]: $1.53-2.42 = -0.89$. Эта величина близка к значению $\Delta A_1 = 0.65$ (табл. 4), но имеет другой знак. Лучшее согласие с решением З. Секанины получается для оцененной им даты разделения 2005.07.24: $3.03-2.42 = 0.61$: наше значение ΔA_1 практически совпадает со значением $\Delta A_r = 0.65$ [11]. Скорости же различаются значительно, как и их ошибки. Причина их расхождений остается непонятной, тем более что, как и в случае с кометой 101P, имеется достаточное количество наблюдений и кометы, и фрагмента. Хотя необходимо отметить, что орбита фрагмента определяется с довольно большой ошибкой, 1.302", наибольшей в табл. 1. Можно отметить также, что интегральная звездная величина (табл. 2) фрагмента $m_1 = 7.3^m$ (11.3^m для кометы), хотя звездная величина фрагмента $m_2 = 18.2^m$ (14.7^m для кометы). Это может говорить о значительном количестве газа и пыли, окружающего фрагмент и затрудняющего его наблюдение.

Как и для кометы 101P, вектор относительной скорости фрагмента направлен в сторону Солнца ($U_3 < 90^\circ$) и имеет значение, близкое к значению для 101P.

Комета P/2013 R3 (Catalina – PANSTARRS)

Комета P/2013 R3 разделилась на 10 или более отдельных компонентов. В работе [12] отмечается, что приливное разрушение можно исключить, так как комета находилась довольно далеко от Солнца и не сближалась с планетами. Образование фрагментов в разное время указывает на то, что разрушение не было результатом столкновения. Сублимация водяных льдов незначительна, поэтому маловероятно, что именно сублимация могла вызвать разрушение этого тела. Делается вывод о том, что разрушение вызвано, вероятнее всего,

вращательной неустойчивостью, а комета P/2013 R3 имеет рыхлую структуру («rubble-pile» — в дословном переводе — «груда щебня»). В качестве времени разрушения называется интервал февраль — сентябрь 2013 г., а дисперсия относительных скоростей между фрагментами оценивается в $0.2\text{--}0.5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Необходимо отметить, что авторы этой работы не использовали методику З. Секанины.

Нами выполнено уточнение орбитальных параметров кометы и фрагментов А и В, результаты которого приведены в табл. 5. Значения СКО для их орбит равны $0.238''$ и $0.214''$ соответственно. В качестве интервала разделения рассматривался интервал январь — ноябрь 2013 г. На рис. 3, 4 приводятся результаты варьирования момента отделения фрагмента А от основного тела для различных наборов уточняемых негравитационных параметров и без них. В табл. 5 приводятся результаты определения обстоятельств разделения.

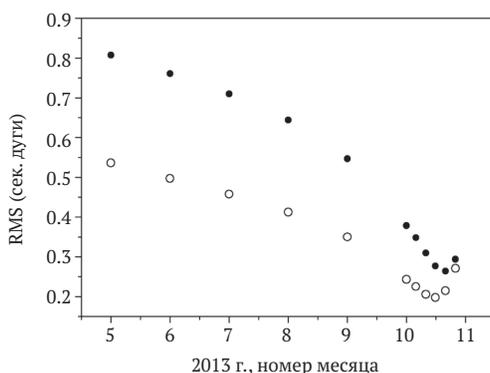


Рис. 3. Фрагмент А. Варьирование даты разделения. Светлые кружки — уточнение компонент скорости фрагмента и A_3 ; темные — уточнение только компонент скорости

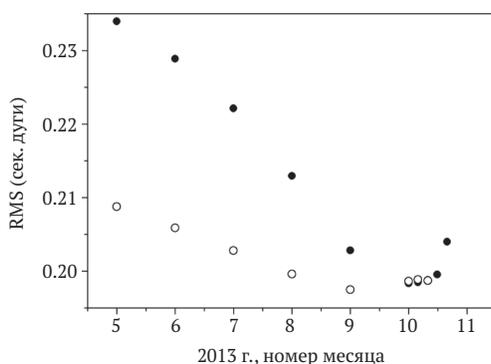


Рис. 4. Фрагмент А. Варьирование даты разделения. Светлые кружки — уточнение компонент скорости фрагмента и A_1, A_2, A_3 ; темные — уточнение компонент скорости и A_2, A_3

Фрагмент P/2013 R3–A
 даты разделения соответствуют минимумам на графиках (рис. 3)

Дата г, а. е.	СКО, "	Негр. парам., (10^{-8} а. е. · сут. $^{-2}$)	U_1	U_2	U_3	$V_{\text{отн}}$ ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)
			°			
2013.09.01* R = 2.21	0.198	$A_1 = -20.2 \pm 5.2$ $A_2 = -7.5 \pm 0.4$ $A_3 = -2.6 \pm 0.1$	0.005	97	6	1.88 ± 0.80
2013.10.01 R = 2.23	0.198	$A_2 = -10.6 \pm 2.0$ $A_3 = -6.9 \pm 0.6$	0.016	78	17	3.96 ± 0.44
2013.10.15 R = 2.24	0.198	$A_3 = -6.7 \pm 0.9$	0.010	95	2	3.83 ± 0.41
2013.10.20 R = 2.25	0.264	—	0.011	94	5	4.16 ± 0.41
Jewitt et al. [12]						0.2 – 0.5 м/с

Рис. 3, 4 показывают, что дата отделения фрагмента А близка к 2013.10.01. Однако все определяемые параметры имеют значительные ошибки, т. к. для фрагмента А имеется всего 30 наблюдений.

Необходимо отметить зависимость между датой разделения, набором учитываемых негравитационных параметров и скоростью разделения, что не позволяет отдать предпочтение какому-либо из вариантов. К результатам работы [12] наиболее близок вариант с учетом всех трех негравитационных параметров, но это противоречит выводам этой работы о том, что сублимация незначительна. Вектор относительной скорости фрагмента А для всех вариантов близок к направлению на Солнце.

Рассмотрим обстоятельства отделения фрагмента В от основного тела. Результаты варьирования времени отделения приводятся на рис. 5. В отличие от фрагмента А, орбита без учета негравитационного ускорения существенно хуже представляет наблюдения фрагмента В, чем с этим учетом. При этом параметр A_1 определяется с большой ошибкой и результаты для этого варианта не приводятся.

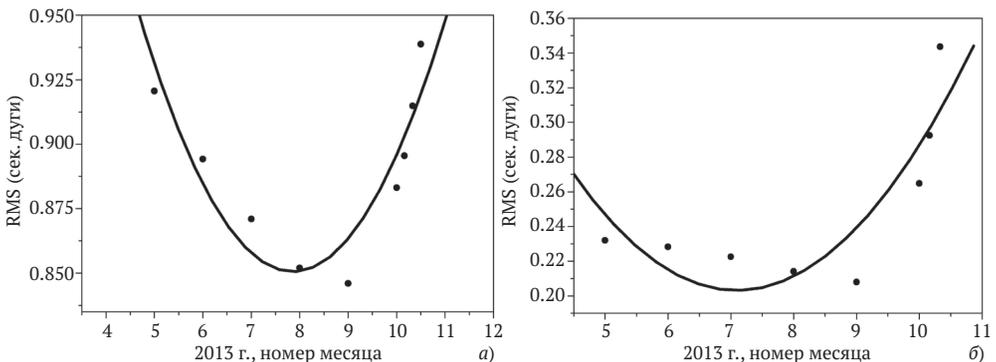


Рис. 5. Фрагмент В:

а) уточнение только компонент скорости; б) уточнение компонент скорости, A_2 и A_3

В табл. 6 приводятся результаты уточнения обстоятельств разделения. Вариант с учетом негравитационного ускорения предпочтительнее, т. к. значительно лучше представляет наблюдения фрагмента В. Однако значение $V_{\text{отн}}$, равное $0.92 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и полученное без учета негравитационного ускорения, ближе к значению, полученному в работе [12]. Отделение фрагментов А и В от основного тела произошло ~ 2013.07.01–2013.10.01. Возможно, что фрагмент В раньше отделился от основного тела, чем фрагмент А.

Рассмотрена также возможность отделения фрагмента В от фрагмента А тем же способом варьирования даты разделения. В этом случае относительные скорости определяются с еще большими ошибками (число наблюдений фрагментов А и В невелико), даты разделения для двух вариантов различаются почти на полгода, поэтому какие-либо выводы о возможности такого варианта разделения сделать затруднительно.

Таблица 6

Фрагмент В. Обстоятельства отделения от основного тела и от фрагмента А

Дата г, а. с.	СКО, "	Неграв. парам., $10^{-8} \text{ а. е.} \cdot \text{сут.}^{-2}$	U_1	U_2	U_3	$V_{\text{отн}}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
			°			
Отделение фрагмента В (СКО = 0.214) от основного тела						
2013.07.01 R = 2.21	0.223	$A_2 = -16.0 \pm 0.6$ $A_3 = 2.6 \pm 0.2$	0.005	83	4	2.16 ± 0.54
2013.08.01 R = 2.20	0.852	—	0.002	101	19	0.92 ± 0.49
Отделение фрагмента В(СКО = 0.214") от фрагмента А						
2013.02.01 R = 2.45	0.203	$A_2 = -2.6 \pm 0.3$ $A_3 = 4.1 \pm 0.1$	0.001	47	64	0.59 ± 2.01
2013.09.01 R = 2.21	0.740	—	0.003	66	147	1.28 ± 0.73

Сравнивая полученные результаты с результатами работы [12], можно отметить, что оценки времени разделения близки. Негравитационные параметры определяются уверенно, хотя в работе [12] отмечается, что сублимация незначительна. В пользу решений с учетом негравитационного ускорения говорит и то, что СКО наблюдений фрагмента в 3–4 раза меньше, чем для решений без этого учета. Ошибки $V_{\text{отн}}$ велики, и с учетом этих ошибок можно сказать, что они не противоречат выводам работы [12].

Вектор относительной скорости фрагмента В относительно основного тела близок к направлению на Солнце. Если рассматривать его относительно фрагмента А, то с большей вероятностью можно говорить о его направлении в сторону от Солнца.

Комета P/2016 J1 (PANSTARRS)

Эта комета разделилась на два фрагмента (А и В) с близкими размерами: 140–900 м и 40–400 м соответственно [13]. В работе [7] были рассмотрены 4×10^4 орбит, образованные с учетом ошибок орбитальных элементов. В ре-

зультате нахождения минимального расстояния между орбитами фрагментов, оценено время разделения в марте — апреле 2010 г., а изучение движения и распределения пыли в хвостах комет приводит к другому интервалу — ноябрь — декабрь 2015 г. Авторы делают вывод о том, что фрагментация и пылевая активность не связаны друг с другом.

В работе [13] на основании астрометрического и фотометрического исследования кометы P/2016 J1 получено, что разделение могло произойти в апреле 2010 г. или в мае — июне 2012 г. со скоростью разделения $0.83 \pm 0.06 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (для первой даты) и $0.70 \pm 0.02 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (для второй даты).

В настоящей работе была рассмотрена возможность разделения вблизи этих дат. На рис. 6 видно, что минимальные значения СКО достигаются примерно вблизи интервала 2010.02.01–2010.03.01 и на эти даты в табл. 7 приводятся данные об обстоятельствах разделения. Видно также, что амплитуда изменений СКО невелика, что приводит к неуверенному определению таким способом момента разделения. Для второго интервала (май — июнь 2012 г.) минимальное значение СКО достигается 2012.03.01 (график не приводится). Также в табл. 7 приводятся данные на даты 2010.04.01 и 2012.06.01 [13], которые отмечены значком (*).

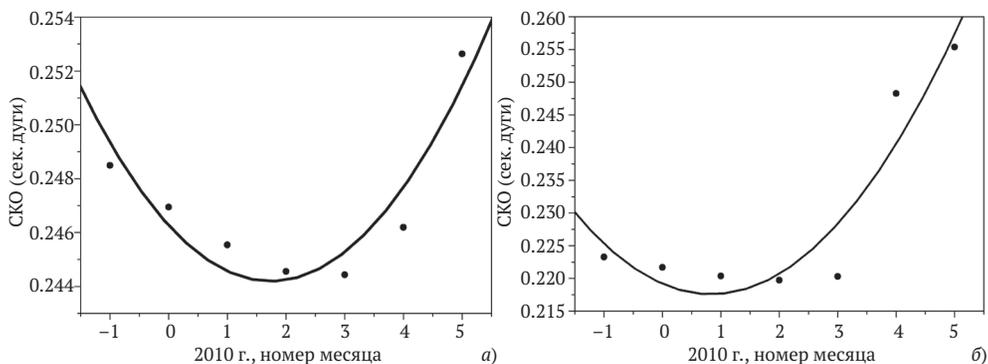


Рис. 6. Значения СКО наблюдений P/2016 J1–В в зависимости от времени отделения от P/2016 J1–А: а) без учета негравитационного ускорения; б) с его учетом

Т а б л и ц а 7

Обстоятельства отделения P/2016 J1–В (СКО = 0.219) от P/2016 J1–А

Дата г, а. е.	СКО, "	Неграв.парам., $10^{-8} \text{ а. е.} \cdot \text{сут.}^{-2}$	U_1	U_2	U_3	$V_{\text{отн}}, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$
			о			
2010.02.01 R = 2.78	0.245	—	0.001	110	149	0.50 ± 1.55
2010.02.01 R = 2.78	0.220	$A_1 = 3.2 \pm 2.6$	0.001	112	147	0.48 ± 1.55
2012.03.01 R = 3.27	0.220	$A_1 = 10.6 \pm 5.9$	0.001	117	37	0.39 ± 0.94
2010.04.01(*) R = 2.66	0.246	—	0.002	104	153	0.71 ± 1.66
2012.06.01(*) R = 3.46	0.248	—	0.003	100	23	0.69 ± 0.81

Данные табл. 7 позволяют сделать следующие выводы. Так как позиционные наблюдения этой кометы немногочисленны, то определяемые значения относительной скорости имеют большие ошибки, хотя сами значения $V_{\text{отн}}$ и даты разделения близки к оцененным в работе [13]. Можно отметить, что параметр A_1 также определяется неуверенно и мало влияет на соответствующее значение скорости $V_{\text{отн}}$. Значения $U_3 > 90^\circ$ получены для решений с наибольшими ошибками $V_{\text{отн}}$ и, по-видимому, нереальны. С наименьшими ошибками определяются значения $V_{\text{отн}}$, равные 0.39 и 0.69 м·с⁻¹.

Не исключено, что комета разделилась раньше исследованного интервала и с небольшой скоростью. Так как размеры фрагментов примерно одинаковы, то дифференциальное негравитационное ускорение может быть близким к нулю. В этом случае фрагменты могут некоторое время оставаться на близких орбитах, а оцененные даты разделения относятся к моментам тесных сближений орбит. Возможно также, что какое-то время эти фрагменты образовывали двойную систему.

Заключение

Для исследования обстоятельств разделения комет предлагается следующий способ, основанный на использовании позиционных наблюдений основного тела и фрагмента. На полученной орбите основного тела с некоторым шагом назначаются моменты разделения. Предполагается, что координаты каждой из этих точек являются общими и для фрагмента также, а компоненты скорости фрагмента и параметры негравитационного ускорения по модели Марсдена (если это возможно) определяются МНК из наблюдений фрагмента. Ошибки координат на опорной орбите не учитываются. Наименьшее значение среднеквадратической ошибки наблюдений фрагмента, полученное в результате вариации времени разделения, определяет дату разделения. Для этой даты определяются компоненты относительной скорости фрагмента и угол между вектором этой скорости и направлением на Солнце, что интересно для понимания процессов, приводящих к разделению комет.

Рассмотрены обстоятельства разделения комет 101P, 213P, P/2013 R3, P/2016 J1. Получены значения относительных скоростей разделения в диапазоне 0.4–4.2 м·с⁻¹, что не противоречит их средним значениям, приведенным в табл. 1. Для первых трех комет векторы относительной скорости фрагмента составляют с направлением на Солнце углы от 2° до 40°, а их относительные скорости превышают 1 м·с⁻¹. Вероятнее всего в этих случаях фрагментация вызывается неравномерным нагревом ядра кометы (thermal stress). Эта причина может приводить к фрагментации даже на больших расстояниях (несколько десятков а. е.) от Солнца [1].

Для случая отделения фрагмента P/2013 R3–B от фрагмента P/2013 R3–A эти углы равны 64° и 147°. Для P/2016 J1 относительные скорости меньше 1 м·с⁻¹ (хотя и определяются с большой ошибкой), что можно интерпретировать как результат вращательной неустойчивости первоначального кометного ядра.

Для фрагментов комет 101P, P/2013 R3 и P/2016 J1 полученные результаты согласуются с результатами других авторов. Для фрагмента кометы 213P различия с работой [11] существенны. Это может быть как результатом недо-

статочного количества наблюдений, так и тем, что реальное движение фрагментов в процессе разделения более сложное, чем предполагается. Результаты приводятся в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Обстоятельства разделения

Фрагмент	Дата разделения	$V_{\text{отн}}, \text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	$U3, ^\circ$
101P/Chernykh–B	1997.03.01	1.66 ± 0.02	24
213P/Van Ness–B	2005.09.01	1.61 ± 0.27	29
P/2013 R3–A	2013.10.01	3.96 ± 0.44	17
P/2013 R3–B	2013.07.01	2.16 ± 0.54	4
P/2016 J1–B	2012.03.01	0.39 ± 0.94	37

Рассмотренный способ исследования обстоятельств разделения комет может применяться наряду с другими методами. Для повышения его точности можно объединить системы условных уравнений для двух тел. При этом уточняемые координаты на момент разделения считать для них общими, а компоненты скорости и параметры негравитационного ускорения уточнять по наблюдениям каждого из тел. Такой алгоритм будет успешнее работать при реализации совместного интегрирования их уравнений движения.

Л и т е р а т у р а

1. *Boehhardt H.* Split comets // Comets II / ed. by Festou M., Keller H. U., Weaver H. A. — Tucson: University of Arizona Press, 2004. — P. 301–316.
2. *Sekanina Z.* Relative motions of fragments of the split comets. I. A new approach // *Icarus*. — 1977. — Vol. 30. — P. 574–594.
3. *Sekanina Z.* Relative motions of fragments of the split comets. II. Separation velocities and differential decelerations for extensively observed comets // *Icarus*. — 1978. — Vol. 33. — P. 173–185.
4. *Sekanina Z.* Relative motions of fragments of the split comets. III. A test of splitting and comets with suspected multiple nuclei // *Icarus*. — 1979. — Vol. 38. — P. 300–316.
5. *Sekanina Z.* The problem of split comets in review // Comets / ed. by Wilkening L. L. — Tucson: University of Arizona, 1982. — P. 251–287.
6. *Marsden B. G., Sekanina Z.* Comets and nongravitational forces. IV // *Astron. J.* — 1971. — Vol. 76 — P. 1135–1151.
7. *Moreno F., Pozuelos F. J., Novaković B. et al.* The splitting of double–component active asteroid P/2016 J1 (PANSTARRS) // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2017. — Vol. 837, no. 1. — 6 p.
8. *Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А.* Массы 27 астероидов, найденные динамическим методом // *Астроном. вестник*. — 2014. — Т. 48, № 4. — С. 318–324.
9. *Marsden B. G., Sekanina Z., Yeomans D. K.* Comets and nongravitational forces. V. // *Astron. J.* — 1973. — Vol. 78. — P. 211.
10. *Sekanina Z.* Comet 101P/Chernykh // *IAU Circ.* № 8670. — 2006.
11. *Sekanina Z.* Comet 213P/Van Ness // *IAU CBET* № 2798. — 2011.
12. *Jewitt D., Agarwal J., Li J., Weaver H., Mutchler M., Larson S.* Disintegrating asteroid P/2013 R3 // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — Vol. 784, no. 1.
13. *Man-To Hui, David J., Xinnan Du.* Split Active Asteroid P/2016 J1 (PANSTARRS) // 2017. — URL: <https://arxiv.org/abs/1702.02766v1> (дата обращения 10.09.2019).

Split Comets and the Circumstances of Splitting for Four Comets

Yu. A. Chernetenko

The circumstances of splitting comets are mainly studied by the method proposed by Z. Sekanina. It is based on the positions of the fragment relative to the comet nucleus as obtained from positional observations of these bodies. Then, the date of separation, the relative velocity and the relative radial component of the fragment nongravitational acceleration are determined by the least squares method (LSM). There are also some other ways to study this phenomenon.

The paper presents an other approach to studying split comets. In the obtained orbit of a comet, moments of separation are assigned at a certain interval. It is assumed that the coordinates of each of these points are also common for the fragment itself. Then, the components of the fragment velocity and the parameters of nongravitational acceleration due to Marsden's model are determined by the LSM from the positional observations of the fragment. Errors of the comet orbit parameters are not taken into account. The smallest RMS value of the fragment observations, obtained as a result of the split time variation, determines the date of splitting. For this date, the components of the relative velocity of the fragment (V_{rel}), and the angle between the vector of this velocity and the direction to the Sun (U_3) are determined.

The circumstances of splitting the 101P, 213P, P/2013 R3, P/2016 J1 comets are considered. The relative separation velocities in the range 0.4–4 m·s⁻¹ were obtained. For the first three comets, the relative velocity vectors of the fragment form 2° to 40° angles with the direction to the Sun. These results can be interpreted to mean that the fragmentation can be caused by uneven heating of the comet's nucleus (thermal stress). For P/2016 J1, relative velocities are less than 1 m·s⁻¹, which may be due to rotational instability of the original cometary nucleus. For the fragments of the 101P and P/2016 J1 comets, the estimations obtained are consistent with the results of other authors. The results obtained are given in the table below.

Fragment	Split date (year, month, day)	V_{rel} , m·s ⁻¹	U_3 , °
101P/Chernykh-B	1997.03.01	1.66 ± 0.02	24
213P/Van Ness-B	2005.09.01	1.61 ± 0.27	29
P/2013 R3-A	2013.10.01	3.96 ± 0.44	17
P/2013 R3-B	2013.07.01	2.16 ± 0.54	4
P/2016 J1-B	2012.03.01	0.39 ± 0.94	37

The method suggested for studying the circumstances of the separation of comets can be used along with other methods. This approach can be improved if we consider integration of the comet equations of motion together with those of the

fragments. In this case, coordinates at the time of separation can be evaluated using the observations of both bodies, and the velocities and nongravitational parameters – according to the observations of each of the bodies considered.

Keywords: comets, split comets, nongravitational acceleration, 101P comet, 213P comet, P/2013 R3 comet, P/2016 J1 comet.