

УДК 523.683

## КОМЕТА БОРЕЛЛИ И МЕТОДЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ МЕТЕОРНЫХ РОЁВ

*Г.В. Жуков, М.Г. Ишмухаметова,  
Е.Д. Кондратьева, В.С. Усанин*

### Аннотация

Комета Борелли, относящаяся к группе Юпитера, привлекла к себе особое внимание благодаря снимкам с аппарата «Deep Space 1». Несмотря на сильные и направленные выбросы вещества, отождествление метеорных роёв с ней будет весьма затруднительно, так как периодические, хотя и не тесные, сближения с Юпитером сильно влияют на элементы орбит метеороидов.

**Ключевые слова:** метеорные потоки, кометы, 19P, Борелли, радиант,  $D$ -критерий, эволюция орбиты.

Комета Борелли была открыта 28 декабря 1904 г. в Марселе и получила имя своего первооткрывателя – Альфонса Борелли. Её орбита определялась рядом авторов, пока она не вошла в кометные каталоги орбит, а влияние негравитационных эффектов на орбиту кометы было подробно рассмотрено Д. Йомансом [1]. Физические наблюдения кометы Борелли наиболее полно изложены С.К. Всехсвятским [2] и его учениками в более поздних работах. Необычная активность кометы наблюдается с Земли и в настоящее время. Например, 7 мая 2009 г. Б. Хойслер [3] обнаружил двойную структуру центрального сгущения кометы, что было подтверждено и другими наблюдателями.

Основной целью запуска NASA космического аппарата «Deep Space 1» являлась отработка новых технологий межпланетного полета. Аппарат был запущен 24 октября 1998 г. Ему предстояло испытать несколько новейших технологий в навигационной и научной аппаратуре. Кроме того, станция прошла вблизи кометы Борелли.

Изображения ядра кометы были получены с невиданным ранее разрешением. Поверхность кометы оказалась очень тёмной, её альbedo всего 3%. Но на этом фоне есть ещё более чёрные пятна, отражающие всего 0.7% падающего света. Своеобразная форма ядра похожа на астероидную, заметен «перегиб» на перемычке между двумя краями. Из пятен выходят пылевые джеты длиной до 60 км. В первом описании снимков они сравнивались с ракетными соплами. Имея такие выбросы, комета должна терять до 2 т своего вещества за 1 мин. Если это так, то через несколько тысяч лет комета Борелли должна разломиться как минимум на две части (рис. 1).

Пока нет никаких сообщений о наблюдениях метеорных потоков, обязанных своим происхождением этой комете. Между тем разделение её ядра на несколько частей было зафиксировано ещё в 1930 г. Это позволяет нам провести моделирование образования и эволюции метеорного роая, связанного с кометой Борелли. Одновременно возникает вопрос о методах отождествления метеорных роёв с кометой-родоначальницей. Мы рассмотрим три из них, являющихся на сегодня основными:



Рис. 1. Комета Борелли

Табл. 1

Сближения кометы Борелли с большими планетами на интервале времени 1930–2130 гг.

Планета	Год сближения	Расстояние, а. е.
Марс	1932	0.17
Юпитер	1936	0.53
Юпитер	1972	0.67
Марс	2015	0.21
Юпитер	2019	0.44
Юпитер	2066	0.75
Юпитер	2102	0.54

отождествление по координатам наблюдаемого и теоретического радианта метеорного потока, использование  $D$ -критерия Р. Саутворта и Дж. Хокинса и метод определения расстояний между орбитами в узлах, модифицированный К.В. Холшевниковым.

В основу моделирования метеорного роя положены элементы орбиты кометы Борелли из каталога А.Ф. Заусаева и А.А. Заусаева [4]:  $t = 1$  января 1930 г. (эпоха элементов),  $M = 220.8997^\circ$  (средняя аномалия),  $\omega = 352.4616^\circ$  (аргумент перигелия),  $\Omega = 78.0253^\circ$  (долгота восходящего узла орбиты),  $i = 30.5333^\circ$  (наклон орбиты к эклиптике),  $e = 0.617163$  (эксцентриситет орбиты),  $a = 3.617227$  а. е. (большая полуось эллиптической орбиты). Все угловые элементы орбиты кометы приведены к эклиптике и равноденствию 2000.0. Интегрирование уравнений движения кометы и модельных метеороидов проводилось по программе Е.А. Резникова с учётом возмущений от семи планет (Венера–Нептун). Сближения кометы с большими планетами на интервале времени 1930–2130 гг. приведены в табл. 1.

Учитывая, что наблюдавшееся в 1930 г. дробление ядра не имело взрывного характера, используем модель выброса частиц с невысокими скоростями в интервале от 100 до 300 м/с. Направление выброса зададим по вектору  $\mathbf{T}$ , то есть перпендикулярно радиусу-вектору кометы в сторону, противоположную её движению. Так мы сможем проследить за максимальным изменением элементов орбит моделируемых частиц (гипотетических метеороидов). Рассмотрим изменения элементов их орбит от момента отделения от ядра родительской кометы в 1930 г.

Табл. 2

Теоретический радиант кометы Борелли

Дата	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$
1931	116.5	-67.4
1938	122.7	-66.2
1960	123.3	-65.7
2018	111.6	-68.0

Табл. 3

Сближения гипотетических метеороидов с Юпитером

Скорость выброса -180 м/с		-185 м/с		-220 м/с	
Дата	Расстояние, а. е.	Дата	Расстояние, а. е.	Дата	Расстояние, а. е.
1936	0.20	1936	0.20	1936	0.27
1948	0.16	1948	0.15	1948	0.46
1959	0.61	1960	0.18	2019	0.50
2031	0.24	2018	0.73	2030	0.19
		2030	0.094		
		2042	0.85		

Табл. 4

Теоретические радианты гипотетических метеороидов

Скорость выброса -180 м/с			-185 м/с			-220 м/с		
Дата	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	Дата	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	Дата	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$
1947	55.8	-72.4	1947	55.3	-72.0	1949	48.8	-67.6
1959	72.8	-76.9	1959	7.8	-62.0	2020	65.5	-67.3
2032	18.3	-69.5	1961	349.7	-36.2	2042	114.5	-57.5
			2031	1.6	-56.2			

Прежде всего обратим внимание на радианты кометы и гипотетических метеороидов. Радиант метеорного потока, наблюдающегося с Земли, определяется наиболее надежно. При визуальных наблюдениях координаты радианта определяются с точностью до одного градуса как по прямому восхождению  $\alpha$ , так и по склонению  $\delta$ . Фотографические и радиолокационные наблюдения дают десятые и сотые доли градуса. С другой стороны, комета-родоначальница имеет свой теоретический радиант, изменения которого на рассмотренном интервале времени, вызванные хотя и не тесными, а только умеренными сближениями с Юпитером, приведены в табл. 2.

Метеороиды также будут испытывать влияние больших планет, и прежде всего Юпитера. Даже при таких небольших скоростях выбросов из ядра кометы эти сближения будут иными. Для примера в табл. 3 приведены параметры сближений с Юпитером трёх гипотетических метеороидов, а в табл. 4 – их теоретические радианты.

Очевидно, что комета, имеющая орбиту, характерную отсутствием тесных (менее 0.33 а. е.) сближений с Юпитером, и её гипотетический рой дают совершенно разные радианты. Следовательно, отождествление по координатам радиантов кометы и метеорного потока для подобных комет не представляется возможным.

Вторым критерием может быть определение наименьшего расстояния между орбитами метеороида и Земли. Этот вопрос тесно связан с первым методом определения теоретических радиантов комет. Ведь они вычисляются для места наибольшего сближения двух тел.

История кометно-метеорных исследований насчитывает несколько способов определения условий взаимного положения двух орбит. В случае, если требуется большая точность определения, задача может быть решена по методу, предложенному профессором Казанского университета А.Д. Дубяго еще в 1949 г. [5]. Идея метода такова: пусть  $M_0$  – точка земной орбиты с гелиоцентрическими координатами  $r_0, v_0$  (длина радиус-вектора и истинная аномалия). На орбите некоторого тела с параметрами  $\omega, \Omega, i, e, a$  находится точка  $M$  с координатами  $r, v$ . Расстояние  $\rho$  между точками  $M_0$  и  $M$  определяется по формуле:

$$\rho^2 = r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos \theta,$$

где  $\theta$  – угол между направлениями на эти точки. Для вычисления минимальных расстояний надо найти корни уравнений:

$$\begin{aligned} r_0 \frac{dr_0}{dv_0} - r \frac{dr_0}{dv_0} - r_0 r \frac{d \cos \theta}{dv_0} &= 0, \\ r \frac{dr}{dv} - r_0 \frac{dr}{dv} - r_0 r \frac{d \cos \theta}{dv} &= 0 \end{aligned}$$

при условии, что

$$r_0 = \frac{p}{1 + e \cos v_0}, \quad r = \frac{p}{1 + e \cos v},$$

где  $p$  – фокальный параметр эллиптической орбиты.

Иная методика была применена Г. Свободой [6]. Здесь в основу положено следующее: если зафиксировать положение некоторых  $n$  точек на земной орбите

$$M_0^{(1)}, M_0^{(2)}, \dots, M_0^{(n)},$$

где

$$M_0^{(k)} = M_0^{(1)} + k \Delta M_0,$$

то для каждой из них можно вычислить расстояние до кометной орбиты. Выбрав из них наименьшее, мы получим искомое значение. В этом случае решение можно найти с любой точностью, уменьшая приращение  $\Delta M_0$ .

Е.Н. Крамер [7] предложил фиксировать точки не на земной орбите, а на орбите кометы. На небольшом участке орбиту Земли можно считать круговой. Тогда имеем

$$r_0^{(k)} = \text{const},$$

а это многое упрощает. Величины  $r^{(k)}$  и  $v^{(k)}$  зафиксированы и всё сводится к выражению

$$\frac{d \cos \theta}{dv_0} = 0,$$

$$\cos \theta = \cos v \cos v_0 + \sin v \sin v_0 \cos i.$$

Истинную аномалию Земли тогда можно найти из выражения:

$$\text{tg } v_0 = \text{tg } v \cos i.$$

В основу программы Е.А. Резникова [8] положена идея Г. Свободы. Однако в ней расстояния вычисляются по формуле:

$$\rho^2 = (A_x(\cos E - e) + B_x \sin E - X)^2 + \\ + (A_y(\cos E - e) + B_y \sin E - Y)^2 + (A_z(\cos E - e) + B_z \sin E - Z)^2,$$

где  $X, Y, Z$  – координаты Земли на данный момент,  $E$  – эксцентрическая аномалия,  $A$  и  $B$  – проективные элементы.

Условие минимума состоит в следующем:

$$(A_x(\cos E - e) + B_x \sin E - X)(-A_x \sin E + B_x \cos E) + \\ + (A_y(\cos E - e) + B_y \sin E - Y)(-A_y \sin E + B_y \cos E) + \\ + (A_z(\cos E - e) + B_z \sin E - Z)(-A_z \sin E + B_z \cos E) = 0.$$

Решая это уравнение относительно  $E$  и подставляя найденное значение в формулу для  $\rho$ , находим расстояние между Землёй и орбитой кометы. Наименьшая из полученных величин и есть искомое значение. Эта программа использовалась нами для анализа орбиты кометы Борелли и её возможного метеорного роя.

Одной из последних работ в этой области является монография К.В. Холшевникова [9], дающая прекрасный анализ современного состояния той части небесной механики, которая связана с определением движения и взаимного положения двух тел в Солнечной системе.

Интегрируя уравнения движения гипотетических метеороидов после выброса из ядра кометы Борелли вперёд от 1930 г., мы определили и наименьшее расстояние между орбитами. Например, орбита частицы, выброшенной со скоростью 180 м/с, в 2014 г. может находиться на расстоянии 0.013 а. е. от орбиты Земли. Общепринято считать это достаточным условием для наблюдений потока. Однако надо учитывать, что точность определения скорости метеорных частиц из наблюдений до сих пор невысока и достигает 1–2 км/с. Следовательно, большие полуоси и эксцентриситеты орбит метеороидов определяются из наблюдений с ошибками, которые при интегрировании назад могут так изменить орбиту, что она пройдет достаточно далеко от ядра кометы-родоначальницы.

Всё это натолкнуло астрономов на поиск новых критериев для решения важного вопроса о генетической связи малых тел Солнечной системы. Рассмотрим математические критерии общности орбит. Большие изменения элементов, придающие орбите заметно другой характер, происходят чаще всего или при прохождении тела через сферу действия Юпитера, или при больших скоростях выброса пылевого вещества из ядра кометы. Исследование влияния Юпитера на элементы орбит тел Солнечной системы началось довольно давно. Первым следует назвать критерий Ф. Тиссерана, предложенный им в 1889 г. и уточненный Калландро в 1892 г. Инвариантом в движении тела является величина  $\Gamma$  – постоянная Тиссерана. По близости постоянной Тиссерана для двух тел Солнечной системы можно судить об общности их происхождения:

$$\Gamma = a^{-1} + 0.16860 p^{1/2} \cos i.$$

Однако почти все кометы семейства Юпитера имеют близкие значения инвариантов в пределах  $0.47 < \Gamma < 0.58$ .

В работе Р. Саутворта и Дж. Хокинса [10] в качестве меры общности применяется расстояние между орбитами тел в пятимерном фазовом пространстве, определённом их элементами орбит. Этот метод известен как  $D$ -критерий и для двух

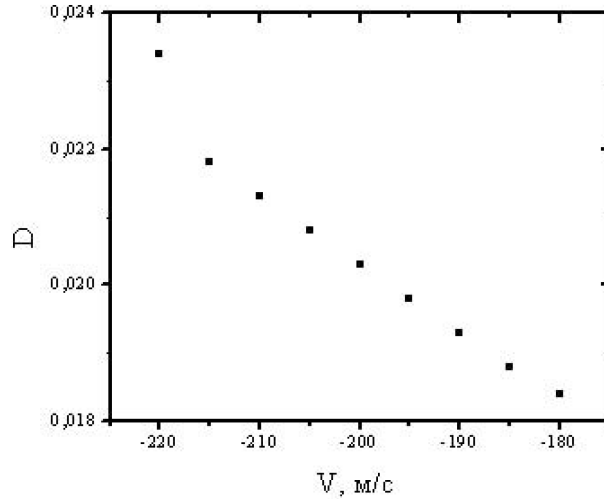


Рис. 2.  $D$ -критерий на момент выброса из кометы в 1930 г.

тел выражается формулой:

$$D^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + (2 \sin(I/2))^2 + ((e_2 + e_1)/2)^2 (2 \sin(W/2))^2, \quad (1)$$

где

$$(2 \sin(I/2))^2 = (2 \sin((i_2 - i_1)/2))^2 + \sin(i_1) \sin(i_2) (2 \sin((\Omega_2 - \Omega_1)/2))^2,$$

$$W = \omega_2 - \omega_1 \pm 2 \arcsin(\cos((i_2 + i_1)/2) \sin((\Omega_2 - \Omega_1)/2) \sec(I/2)).$$

Знак «минус» в выражении для  $W$  ставится, когда  $|\Omega_2 - \Omega_1| > 180^\circ$ . Принимается, что два тела будут иметь общее происхождение, если расстояние  $D$  между их орбитами в заданном пространстве окажется меньше некоторой величины  $D_{\max}$ . Так, например, для метеорных потоков (Персеид, Геменид, Орионид, Квадрантид и других)  $D_{\max}$  принимают равным 0.2. Однако к этой критической величине надо относиться осторожно. Методика вычислений  $D$  предполагает, что элементы орбит двух тел достаточно точны или хотя бы ошибки их измерений значительно меньше, чем реальная дисперсия орбит в рое. Это условие, как уже отмечалось выше, не всегда выполняется. Позднее формула (1)  $D$ -критерия неоднократно модифицировалась, но это не привело к каким-либо принципиальным изменениям.

Интересно проследить динамику значений  $D$ -критерия в зависимости от эволюции метеорного роя. На рис. 2 показано изменение величины  $D$  в момент выброса метеороидов из ядра в зависимости от скорости их выброса. Сравнение по формуле (1) проводится с элементами орбиты кометы Борелли на тот же момент времени. На рис. 3 показано изменение  $D$ -критерия для метеороидов, выброшенных с теми же скоростями выброса, но элементы их орбит проинтегрированы на момент 2010 г. Мы выбрали для сравнения 2010 год – до момента сближения кометы с Юпитером на расстоянии 0.44 а. е. в 2019 г. Значения  $D$ -критерия в этом случае вычислялись как разность исходных элементов орбиты кометы (черные точки) и элементов орбиты кометы, проинтегрированных на момент 2010 г. (белые точки). Как мы видим, графики практически идентичны.

Таким образом, если метеорный поток, образованный пылевыми выбросами из ядра кометы Борелли, и будет наблюдаться, то доказать их генетическую связь

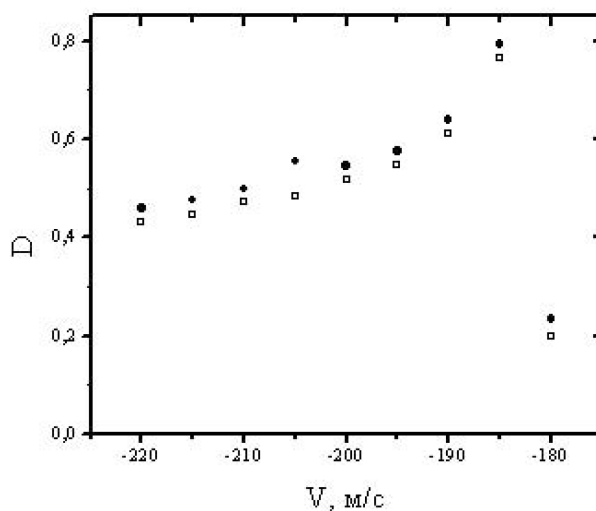


Рис. 3.  $D$ -критерий на 2010 г. в сравнении с исходными элементами орбиты кометы (чёрные точки) и с элементами орбиты кометы на 2010 г. (белые точки)

с помощью  $D$ -критерия будет так же трудно, как и другими рассмотренными выше методами отождествления малых тел Солнечной системы. Всё это приводит нас к заключению, что для комет, относящихся к группе Юпитера, при изучении общности метеороидов и поиске их комет-родоначальниц необходим комплексный подход и тщательный анализ возмущенных орбит как кометы, так и метеорных частиц.

### Summary

*G. V. Zhukov, M. G. Ishmukhametova, E. D. Kondrat'eva, V. S. Usanin.* Comet Borrelly and Meteoroid Swarms Identification Methods.

The Jupiter family comet Borrelly drew special attention to itself because of the images taken by the *Deep Space 1* space probe. In spite of the strong and directed ejections of material, the identification of meteoroid swarms with it will be very difficult, since periodic, although not close, approaches with Jupiter strongly affect the orbital elements of meteoroids.

**Key words:** meteoroid streams, comets, 19P, Borrelly, radiant,  $D$ -criterion, orbital evolution.

### Литература

1. *Yeomans D.K.* A non-newtonian orbit for periodic comet Borrelly // The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets; Proceedings from IAU Symposium No 45, held in Leningrad, U.S.S.R., August 4–11, 1970. – Dordrecht: Reidel, 1972. – P. 187–189.
2. *Всехсвятский С.К.* Физические характеристики комет. – М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1958. – 575 с.
3. *Haesler B.* 19P/Borrelly // Amication. Das Leben jenseit von Bevormundung und Erziehung. – 2009. – URL: [http://www.amication.de/Bernhards\\_Comet\\_Project/19p\\_20090507\\_large.htm](http://www.amication.de/Bernhards_Comet_Project/19p_20090507_large.htm), свободный.
4. *Заусаев А.Ф., Заусаев А.А.* Каталог орбитальной эволюции короткопериодических комет с 1900 по 2100 гг. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 346 с.

5. *Дубяго А.Д.* Определение орбит. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1949. – 444 с.
6. *Svoboda H.* Déduction du point radiant d'étoiles filantes des éléments de l'orbite d'une comète et démonstration de la connexion des Aquariides et Orionides avec la comète de Halley // Bulletin international de l'Académie des Sciences de Bohême. – 1914.
7. *Краммер Е.Н.* О вычислении наибольшего сближения орбит Земли и кометы // Изв. Туркменского филиала АН СССР. – 1950. – № 3. – С. 95–96.
8. *Резников Е.А.* О возможном возрасте метеорного потока Понс-Виннекид // Труды Казан. город. астроном. обсерватории. – 1976. – Вып. 42. – С. 108–115.
9. *Холшевников К.В., Титов В.В.* Задача двух тел. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 180 с.
10. *Southworth R.B., Hawkins G.S.* Statistics of meteor streams // Smithson. Contr. Astrophys. – 1963. – V. 7. – P. 261–285.

Поступила в редакцию  
05.10.09

---

**Жуков Георгий Викторович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии, заместитель декана физического факультета Казанского государственного университета.

E-mail: *Gera.Zhukov@ksu.ru*

**Ишмухаметова Марина Геннадьевна** – кандидат физико-математических наук, заведующая метеорным отделом Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского государственного университета.

E-mail: *mig-ksu@mail.ru*

**Кондратьева Екатерина Дмитриевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского государственного университета.

**Усанин Владимир Сергеевич** – инженер метеорного отдела Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта, аспирант кафедры астрономии и космической геодезии Казанского государственного университета.

E-mail: *Vladimir.Usanin@ksu.ru*