

УДК 523.68

Возраст, происхождение и эволюция метеорного роя Геминид

Е. Н. Крамер, И. С. Шестака

Методом ретроспективного анализа вековых возмущений от больших планет (с учетом эффекта Пойнтинга — Робертсона) изучена эволюция метеорного роя Геминид на интервале около 4000 лет. Подтверждается возможная генетическая связь роя с объектом 1983 TB. Получено, что возраст роя не превышает 1000 лет, и примерно еще в продолжение 400 лет рой останется таким же компактным.

THE AGE, ORIGIN AND EVOLUTION OF GEMINIDS' METEOR SWARM, by Kramer E. N., Shestaka I. S.— The evolution of Geminids' meteor swarm has been studied by the method of retrospective secular perturbation analysis within 4000 years accounting for the Poinsing-Robertson effect. A possible genetic relation between the swarm and the object 1983 TB has been confirmed. It has been estimated that the swarm's age does not exceed 1000 years, and the swarm will remain as compact as it is for 400 years more.

Вопросы происхождения и эволюции метеорных потоков, в частности известного с середины прошлого века потока Геминид, привлекают пристальное внимание исследователей на протяжении последних 10—15 лет [1—7, 9—19, 21, 22, 26, 27]. При этом используются численные методы учета вековых возмущений большими планетами орбит того или иного роя в течение продолжительных интервалов времени — от десятков тысяч до сотен тысяч лет назад от современной эпохи.

Поскольку вековые возмущения со временем увеличивают дисперсии орбитальных элементов, есть основания полагать, что в случае общего происхождения объектов, входящих в рой, дисперсии их элементов должны уменьшаться при интегрировании уравнений движения назад от начальной эпохи. В качестве величины, характеризующей компактность орбит в рое, обычно используется фазовое расстояние D между орбитами, являющееся функцией дисперсии пяти элементов орбиты — ω , Ω , i , e , q . Следовательно, фазовые расстояния между орбитами генетически связанных объектов в прошлом должны были быть меньше, чем в настоящее время.

Анализ вековых возмущений 135 фотографических орбит метеоров потока Геминид на интервале 80 тыс. лет показал, что среднее фазовое расстояние орбит \bar{D} от некоторой средней орбиты роя изменяется циклически с общей тенденцией к возрастанию от значения 0.08 как вперед, так и назад от начальной эпохи [10, 11].

Возрастание \bar{D} в будущем объясняется тем, что вековые возмущения увеличивают со временем дисперсию элементов орбиты, разрушают рой (например, в продолжение 30 тыс. лет разброс эксцентриситетов орбит роя Геминид достигает 0.15, перигелийных расстояний — 0.18 а. е., аргументов перигелисов и долгот восходящих узлов — около 200°).

При интегрировании назад \bar{D} также возрастает. Создается впечатление, что со временем происходит фокусировка орбит. Однако для такого обильного потока гравитационная фокусировка орбит маловероятна. Естественнее возрастание \bar{D} при интегрировании назад объяснить формальным характером процесса численного интегрирования, который симметричен относительно момента формирования роя. Следовательно, возрастание \bar{D} в рое Геминид при интегрировании назад свидетельствует о том, что рой возник сравнительно недавно. За время существования его компактность практически не изменилась. Об этом (и о сравнительной молодости Геминид) говорят также небольшие значения фазовых расстояний индивидуальных орбит от средней орбиты роя, составляющие в среднем 0.08.

К тому же 49 из 139 орбит Геминид обнаруживают в отличие от среднего фазового расстояния \bar{D} тенденцию к уменьшению индивидуальных значений D при интегрировании только на 400—1200 лет назад. Интегрирование же дальше от начальной эпохи приводит к резкому возрастанию D исследуемых орбит, что позволяет оценить время образования роя Геминид не более чем в 1000 лет назад. В таком случае интегрирование уравнений движения Геминид далеко назад лишено смысла, поскольку до момента возникновения роя (т. е. до момента предполагаемой дезинтеграции некоторого родительского тела) частицы роя не существовали и исследование их эволюции в эпохи, предшествовавшие этому моменту, носят формальный характер.

П. Б. Бабаджанов и Ю. В. Обрубов [2] оценили возраст метеорного роя Геминид, исходя из предположения, что различия больших полюсей крупных и малых частиц роя

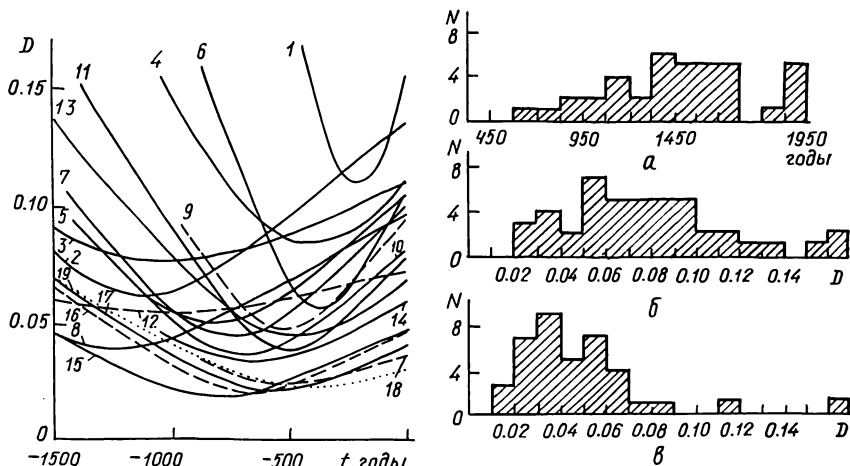


Рис. 1. Изменение фазовых расстояний от объекта 1983 ТВ девятнадцати фотографических метеоров

Рис. 2. Распределение моментов достижения минимальных фазовых расстояний Геминид от 1983 ТВ (а), распределения фазовых расстояний от 1983 ТВ в начальную эпоху (б) и в моменты достижения минимальных значений D (в)

обусловлены главным образом влиянием эффекта Пойнтинга—Робертсона и его курускулярного аналога. Для значения плотности от 0.3 до 7.6 г/см³ возраст роя, по [2], заключен в интервале 1600—19 000 лет. Джонс [22] из тех же соображений считает, что возраст Геминид составляет 4750 лет.

В октябре 1983 г. появилось сообщение [24] об открытии ИК-спутником IRAS быстроперемещающегося объекта 17^м, получившего название 1983 ТВ. Его орбита средни орбитам астероидов группы Аполлона—Амура: подобно им, объект 1983 ТВ заходит внутрь орбиты Земли. Уиппл [25] на основании близости элементов орбит вновь открытого тела и метеороидов, порождающих Геминиды (табл. 1), высказал мысль о том, что объект 1983 ТВ представляет собой родительское тело метеорного роя Геминид. Вскоре и другие исследователи [4, 20, 26], сопоставляя современные и возмущенные элементы роя и 1983 ТВ, пришли к заключению о большой вероятности генетической связи этих объектов.

Мы также исследовали эволюцию орбит роя Геминид и объекта 1983 ТВ под действием вековых возмущений от всех 9 больших планет с учетом эффекта Пойнтинга—Робертсона на 2000 лет назад с шагом интегрирования 20 лет. Для этой цели выбраны 65 наиболее точных фотографических орбит роя. Анализ вычисленных по возмущенным элементам орбит фазовых расстояний D от орбиты объекта 1983 ТВ показывает, что около 75 % всех исследуемых орбит обнаруживают в прошлом сближения с орбитой предполагаемого родительского тела. Для иллюстрации на рис. 1 приведен характер изменения D нескольких орбит Геминид в интервале 1500 лет: наблюдается четко выраженная тенденция к уменьшению D .

Характер распределения моментов достижения минимальных значений D исследуемых орбит (рис. 2, а), а также распределений самих фазовых расстояний метеорных

орбит от орбиты 1983 *TB* в начальную эпоху (рис. 2, б) и в соответствующие моменты достижения минимумов *D* (рис. 2, в) позволяют сделать независимый вывод о том, что выброс зарегистрированных метеорных частиц мог произойти примерно 400—800 лет назад. Однако дать однозначный ответ на вопрос о времени образования роя Геминид в результате дезинтеграции родительского тела на основании анализа вековых возмущений и фазовых расстояний не удастся. Скорее всего, выбросы из родительского тела происходят перманентно, и Земля встречает на своем пути частицы, выброшенные в разное время.

Таблица 1. Средние элементы орбиты роя Геминид и объекта 1983 *TB*

Элементы орбиты	ω , град	Ω , град	<i>i</i> , град	<i>e</i>	<i>q</i> , а. е.	<i>q'</i> , а. е.
Средняя орбита Геминид	324.61 ± ±1.75	260.45 ± ±1.84	24.00 ± ±1.79	0.900 ± ±0.009	0.137 ± ±0.011	2.723 ± ±0.197
Орбита 1983 <i>TB</i>	321.68	265.04	22.03	0.890	0.140	2.403

Таблица 2. Скорости выброса частиц из ядра 1983 *TB* (модель)

Элементы орбиты	Момент выброса, лет (от начальной эпохи 1950.0)					
	—480		—400		—360	
	1983 <i>TB</i>	Частица	1983 <i>TB</i>	Частица	1983 <i>TB</i>	Частица
ω , град	311.556	313.806	315.098	308.686	315.837	311.703
Ω , град	273.134	272.233	271.592	273.050	270.853	271.592
<i>i</i> , град	19.165	18.923	19.629	20.408	19.864	21.475
<i>e</i>	0.8946	0.9048	0.8940	0.9173	0.8936	0.9314
<i>q</i> , а. е.	0.1339	0.1340	0.1348	0.1341	0.1352	0.1151
<i>v</i> , град	96.532	97.134	78.258	83.299	85.827	86.394
Скорость выброса, км/с	0.94		5.2		3.0	

Примечание. *v* — истинная аномалия.

Расчеты показывают, что одна из узловых точек орбиты 1983 *TB* удалена от орбиты Земли приблизительно на 0.125 а. е., что свидетельствует о больших размерах сечения плоскостью эклиптики роя, который мог быть порожден этим объектом. К тому же, как видно из табл. 1, долготы восходящих узлов орбит роя и 1983 *TB* различаются почти на 5°. Оба отмеченных факта могут свидетельствовать о значительных скоростях выброса вещества из 1983 *TB*.

Оценить скорости выброса можно разными способами. Наиболее статистически обоснован метод, описанный в [8]. Как и метод кометных радиантов, он априори исходит из предположения о недавнем формировании метеорных роев, что позволяет сравнивать современные наблюдаемые и теоретические (рассчитанные с заданной скоростью выброса) элементы орбит и по наименьшему различию элементов выбирать предполагаемую скорость выброса.

Зная элементы орбит родительского тела и метеорной частицы роя для любого момента времени в прошлом, легко определить точку наибольшего сближения этих орбит и, считая ее точкой выброса, оценить разность скоростей родительского тела и частицы в этой точке, т. е. найти скорость выброса. Значения скоростей моделированных нами выбросов из 1983 *TB*, полученные по возмущенным элементам орбит в моменты —480, —400 и —360 лет (от начальной эпохи 1950.0), приведены в табл. 2. Эти скорости лежат в пределах 1 ÷ 5 км/с. Аналогичные значения скоростей выброса из объекта 1983 *TB* получены (по нашей просьбе) Н. В. Куликовой методом статистических испытаний.

Наконец, независимые оценки скоростей выброса можно получить, сравнивая фазовые расстояния от родительского тела реальных частиц и разности долгот восходя-

щих узлов их орбит с соответствующими величинами, полученными путем моделирования выброса с заданными скоростями выброса (табл. 3). Интерполируя данные табл. 3 для \bar{D} и $\overline{\Delta\Omega}$, приведенных в последней строке таблицы, получаем скорости выброса в афелии порядка $0.5 \div 1.0$ км/с, в перигелии ~ 5 км/с. Различные способы оценки скорости выброса вещества из родительского тела 1983 ТВ приводят к значениям порядка $1 \div 5$ км/с. Вопрос о механизме, обеспечивающем столь большие кометоцентрические скорости фрагментов, требует особых исследований.

Таблица 3. Зависимость скорости выброса фрагментов из родительского тела от \bar{D} и $\overline{\Delta\Omega}$ (моделирование выброса в афелии и перигелии орбиты родительского тела и в точке с истинной аномалией 90°)

Точка выброса	\bar{D}	$\overline{\Delta\Omega}$, град	Средняя скорость выброса, км/с
Афелий	0.006	0.54	0.056
	0.023	2.79	0.220
	0.102	14.90	0.793
	0.141	18.57	1.232
	0.399	28.26	2.296
	0.651	46.25	5.621
Перигелий	0.001	0.04	0.056
	0.005	0,14	0.220
	0.012	0.52	0.793
	0.018	1.33	1.232
	0.092	3.91	5.621
$v=90^\circ$	0.015	0.90	0.947
	0.057	2.64	1.463
	0.085	3.87	5.188
Средняя наблюдаемая орбита	0.081	4.2	—

В метеорном рое Геминид частицы распределены приблизительно равномерно вдоль орбиты, образуя вокруг нее своеобразный эллиптический торонд. Соответствующий метеорный поток наблюдается с Земли ежегодно. Вековые возмущения изменяют положение линии апсид средней орбиты роя так, что примерно за 30—35 тыс. лет она совершает полный оборот. При этом рои четырежды (в восходящем и нисходящем узлах орбиты) сближается с орбитой Земли.

Учет вековых возмущений от девяти больших планет показывает, что метеорный поток, соответствующий рою Геминид, может наблюдаться лишь при одном или двух сближениях эллиптического торонда с орбитой Земли. Это вытекает из следующих соображений. Орбиты частиц роя пересекают плоскость эклиптики в узловых точках, лежащих внутри некоторого эллипса рассеяния. При фиксированной средней концентрации частиц в метеорном рою интенсивность наблюдаемого потока (часовое число метеоров) обратно пропорциональна площади этого эллипса. Вековые возмущения не только изменяют положение центра эллипса рассеяния относительно орбиты Земли, но и увеличивают его размеры.

Полярные координаты узловых точек орбит (полярный угол φ и гелиоцентрическое расстояние r) определяются соотношениями

$$\varphi = \Omega, \quad r = a(1 - e^2)/(1 \pm e \cos \omega).$$

Большие полуоси орбит роя очень медленно изменяются за счет негравитационных возмущений (примерно на 0.01 а. е. за каждые 10 тыс. лет); эксцентриситеты испытывают периодические колебания с амплитудой около 0.07. Таким образом, совершенно очевидно, что разброс узловых точек определяется в основном величинами разброса аргументов перигелиев и долгот восходящих узлов орбит.

В нулевой момент времени (1950.0) для всех исследуемых метеоров численные значения r около 0.988 ± 0.002 а. е. Спустя 30 тыс. лет разброс вычисленных значений гелиоцентрических расстояний составляет уже $0.5 \div 0.7$ а. е. При этом узловые точки образуют узкую полосу. Следовательно, концентрацию узловых точек можно считать обратно пропорциональной длине этой полосы.

За время от одного сближения средней орбиты роя с орбитой Земли до другого такого сближения длина соответствующей полосы и площадь эллипса рассеяния узловых точек увеличиваются в сотни раз. Во столько же раз уменьшается концентрация узловых точек и интенсивность наблюдаемого потока (часовое число метеоров), т. е. поток ослабевает более чем в сто раз и практически перестает существовать, хотя метеорный рой еще долго может оставаться довольно компактным, сохраняя для некоторых эпох малые значения фазовых расстояний от средней орбиты или от орбиты родительского тела.

Необходимым условием наблюдения метеорного потока является совпадение момента минимума значений D для роя и времени сближения роя с орбитой Земли. Такие совпадения маловероятны даже тогда, когда метеорный рой еще достаточно молод, а со временем фазовые расстояния увеличиваются, и рой постепенно разрушается. Отсюда следует возможность наблюдения метеорного потока только в продолжение одного или двух сближений роя с орбитой Земли, когда разброс значений аргументов перигелиев орбит еще сравнительно невелик и, следовательно, фазовые расстояния орбит внутри роя сохраняют достаточно малые значения.

Изменение аргумента перигелия i -й орбиты со временем можно приблизительно аппроксимировать линейным законом [23]

$$\omega_i(t) = \omega_{0i} + n_i t,$$

где ω_{0i} — значение аргумента перигелия i -й орбиты роя в некоторый начальный момент времени $t=0$, $n_i = 2\pi/P_i$, P_i — время полного оборота линии апсид i -й орбиты.

Для каждой орбиты роя ω_{0i} и n_i принимают случайные значения. Следовательно, случайными будут также значения аргумента перигелия $\omega_i(t)$ в произвольный момент времени. Согласно закону сложения дисперсий, дисперсия значений аргумента перигелия

$$\sigma_{\omega_i}^2 = \sigma_{\omega_0}^2 + t^2 \sigma_n^2 + 2t \rho_{\omega_0 n} \sigma_{\omega_0} \sigma_n,$$

где $\sigma_{\omega_0}^2$ и σ_n^2 — дисперсии ω_{0i} и n_i , $\rho_{\omega_0 n}$ — коэффициент корреляции между ω_{0i} и n_i . Минимум этой функции (при условии, что статистические моменты выборки σ_{ω_0} , σ_n и $\rho_{\omega_0 n}$ остаются постоянными) достигается при $t_{\min} = -2(\rho_{\omega_0 n} \sigma_{\omega_0})/\sigma_n$.

Для рассматриваемой выборки, состоящей из 94 наиболее точных орбит метеорного потока Геминид, введенные выше характеристики равны: $\sigma_{\omega_0} = 0.031$, $\sigma_n = 0.000029$ и $\rho_{\omega_0 n} = -0.34$.

Таким образом, минимум дисперсии аргумента перигелия орбит в метеорном рое Геминид будет достигнут примерно через 400 лет. Отметим, что дисперсия значений ω в минимуме почти не отличается от современного ее значения $\sigma_{\omega_0} = 0.031$, а $(\sigma_{\omega})_{\min} = 0.029$.

Итак, если считать исследованные 94 орбиты типичными для роя Геминид, то можно сделать вывод, что метеорный рой Геминид останется таким компактным еще примерно в течение 400 лет. Однако это не означает, что в продолжение всего этого времени будет наблюдаться соответствующий метеорный поток. Вследствие возмущений средняя орбита сместится относительно орбиты Земли примерно на 0.2 а. е., и земная орбита, по-видимому, окажется вне эллипса рассеяния узловых точек орбит роя — поток перестанет быть видимым с Земли.

1. Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В. Эволюция орбиты метеорного роя Геминид // Докл. АН ТаджССР.— 1979.—22, № 8.— С. 466—470.
2. Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В. Особенности эволюции метеорных роев Геминид и Квадрантид // Астрон. журн.— 1984.—61, № 5.— С. 1005—1012.
3. Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В. Эволюция орбит и условий встречи с Землей метеорных роев Геминид и Квадрантид // Астрономия и геодезия, Томск.— 1984.— № 10.— С. 125—130.
4. Белькович О. И., Рябова Г. И. Модель образования метеорного роя Геминид // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Метеорные тела в межпланетном пространстве и земной атмосфере», 17—22 сент. 1984 г., Суздаль.— М., 1984.— С. 15—16.
5. Белькович О. И., Сулейманов Н. И., Тохтаев В. С. Структурные особенности потока Геминид с точки зрения его формирования // Тез. докл. Всесоюз. симпозиум «Проблемы радиометрического исследования атмосферы».— Харьков, 1977.— С. 30—31.
6. Галибина И. В., Терентьева А. К. Эволюция орбиты роя Геминид на протяжении 100 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 249.— С. 3—4.

7. *Казанцев А. М., Шербаум Л. М.* Образование метеорного роя Геминид и начальная стадия его эволюции. Модельный расчет. I // Вестн. Киев. ун-та.— 1981.— № 23.— С. 105—109.
8. *Катасев Л. А., Куликова Н. В.* Применение метода статистических испытаний к теории образования метеорных потоков // Пыль в атмосфере и околоземном пространстве.— М.: Наука, 1973.— С. 56—60.
9. *Крамер Е. Н., Тимченко-Острроверхова Е. А.* Вековые возмущения метеорных роев и трансформация метеорных потоков // Астрон. вестн.— 1981.— 15, № 1.— С. 50—54.
10. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Возможный механизм образования короткопериодических метеорных роев // Там же.— 1984.— 18, № 2.— С. 137—144.
11. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Метеорные рои и струйные потоки // Метеор. исслед.— 1984.— № 11.— С. 72—80.
12. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Возраст метеорного роя Геминид // Комет. циркуляр.— 1985.— № 342.— С. 3—4.
13. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Эволюция связки орбит в метеорном рое Геминид // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 4.— С. 73—77.
14. *Обрубов Ю. В.* Об образовании метеорного роя Геминид // Докл. АН ТаджССР.— 1980.— 23, № 4.— С. 175—179.
15. *Обрубов Ю. В.* Эволюция орбит и условий встречи с Землей метеорных роев η -Акварид, Орионид, Геминид и Квадрантид: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— М., 1982.— 18 с.
16. *Обрубов Ю. В., Шербаум Л. М.* Эволюция орбиты роя Геминид на интервале 30 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 244.— С. 4.
17. *Терентьева А. К., Галибина И. В.* Эволюция радианта метеорного потока Геминид под влиянием вековых возмущений // Астрон. циркуляр.— 1983.— № 1256.— С. 5—6.
18. *Babadzanov P. B., Obrubov Yu. V.* Evolution of orbits and intersection conditions with the Earth of Geminid and Quadrantid meteor streams // Solid particles in the Solar system.— Dordrecht, Holland, 1980.— P. 157—162.— (IAU symp.; N 90).
19. *Fox K., Williams I. P., Hughes D. W.* The rate profile of Geminid meteor shower // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1983.— 205, N 3.— P. 1155—1169.
20. *Fox K., Williams I. P., Hughes D. W.* The «Geminid» asteroid (1983 TB) and its orbital evolution // Ibid.— 1984.— 208, N 3.— P. 11—15.
21. *Hughes D. W.* Meteor stream formation after cometary decay // Space Res.— 1977.— 17.— P. 565—570.
22. *Jones J.* On the period of Geminid meteor stream // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1978.— 183, N 2.— P. 539—546.
23. *Ópik E. J.* Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // Proc. Roy. Irish Acad.— 1951.— 54, sect. A.— N 2.— P. 165—199.
24. *Robinson L. J.* The frigid world of IRAS-1 // Sky and Telescope.— 1984.— 67, N 1.— P. 4—8.
25. *Whipple F. L.*— Circular IAU.— 1983.— N 3881.— P. 1.
26. *Williams I. P.* Physical processes affecting the motion of small bodies in the Solar system and their application to the evolution of meteor streams // Dynamical Trapping and Evolution in the Solar System.— Dordrecht: Reidel Publ. Co., 1983.— P. 83—87.
27. *Williams I. P.* The dynamics of the minor bodies in the Solar system // Vistas Astron.— 1984.— 27.— P. 217—219.

Астрон. обсерватория
Одес. ун-та им. И. И. Мечникова,
Одесса

Поступила в редакцию 01.10.85,
после доработки 26.11.85