

Российская академия наук  
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН

№ 154

М. Д. Замарашкина

**Эволюция орбиты кометы ШЛ9 до момента  
открытия**

Санкт-Петербург  
2003

М. Д. Замарашкина. Эволюция орбиты кометы ШЛ9 до момента открытия.

**Ключевые слова:** комета Шумейкеров–Леви 9 : динамика, эволюция орбиты.

На основе статистического исследования сделан вывод о наиболее вероятном происхождении кометы ШЛ9 как долговременного спутника Юпитера. Рассмотрена гипотеза о возможной генетической связи кометы Шумейкеров–Леви 9 (ШЛ9) с кометами Отерма и Герелс 3. Получены данные, выявляющие возможную генетическую связь кометы ШЛ9 со скоплением астероидов "Греки". На основе численной теории движения кометы проанализирована возможность эпиковского захвата. Сделан анализ значимости различных возмущений в движении кометы, находящейся в окрестности Юпитера, с целью построения более точной ее орбиты.

M. Zamarashkina. Orbit evolution of comet Shoemaker–Levy 9 before discovery.

**Keywords:** Comet Shoemaker–Levy 9: dynamics, orbital evolution.

The theory of capture of comet Shoemaker–Levy 9 (SL9) has been considered. The genetic relations among this comet and families of Trojans and Greeks are investigated. The circumstance of approach of SH9 with Gerels 3 and Oterma comets has been calculated.

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 154 – Санкт-Петербург, 2003. – 28 с.

## Содержание

1. Обзор современного состояния литературы по данному вопросу	4
2. Силы, определяющие движение кометы в окрестности Юпитера	5
3. Параметры орбиты фрагмента Н	9
4. Алгоритм выбора начальных данных	11
5. Гистограмма распределения трех вариантов эволюции кометы	13
6. Исследование траектории движения кометы на орбите спутника Юпитера с 1700 по 1992 годы	15
6.1. Исследование возможной генетической связи кометы ШЛ9 с кометами семейства Юпитера . . . . .	16
7. Исследование возможной генетической связи кометы со скоплениями астероидов "Греки"и "Троянцы"	18
8. Исследование эпиковского захвата как одного из вариантов эволюции орбиты кометы Шумейкеров–Леви 9	20
8.1. История и развитие эпиковской теории захвата . . . . .	20
8.2. Применение теории захвата к движению кометы ШЛ9 . .	21
9. Негравитационные эффекты в движении комет	23
9.1. Исторический обзор . . . . .	23
9.2. Определение величины негравитационного ускорения в движении кометы ШЛ9 по наблюдениям ее фрагментов .	24
10. Заключение	25
Список литературы	26

## 1. Обзор современного состояния литературы по данному вопросу

Первые наблюдения показали, что комета состоит из большого числа фрагментов. Объект наблюдения располагался на небе примерно на расстоянии 4 градусов от Юпитера. С самого начала стало ясно, что открыт необычный объект. Первые же попытки определения орбитальных параметров показали, что в 1992 году комета имела тесное сближение с Юпитером. Это, вероятнее всего, и стало причиной ее распада на большое количество фрагментов. Разрушение или распад ядер вследствие приливного возмущения от больших планет и Солнца, вероятно, является достаточно частым явлением в эволюции комет. Наблюдалось несколько подобных событий. Комета Брукса 2 в момент открытия в 1889 году состояла из пяти крупных фрагментов. Вероятнее всего, распад родительского тела произошел при сближении кометы с Юпитером на расстояние примерно 140000 км от центра планеты [1]. Хилл [2] обнаружил пять пятен на Юпитере, по характеристикам сходных с наблюдаемыми событиями при падении фрагментов ШЛ9. Кометы группы Крейца, имеющие небольшие перигелийные расстояния, образовались в результате распада одной или нескольких комет.

К настоящему времени существует несколько теорий появления кометы ШЛ9 около Юпитера в 1992 году:

1. 29.01.1990 комета сблизились на расстояние 1 а.е. с Юпитером и была захвачена (*Sitarski G.* [3]).
2. Комета находилась на спутниковой орбите Юпитера как минимум одно столетие до распада (*L.A.M.Benner, W.B.McKinnon* [4]).
3. Комета была захвачена Юпитером в 1929 году (*Chodas P. W., Yeomans D. K.* [5]).
4. Реализован эпиковский механизм захвата кометы при тесном сближении с Юпитером в 1992 году (*Давыдов В.Д.* [6]).
5. Комета появилась в результате распада астероида из скопления "Троянцев" (*Marzari F., Farinella P., Vanzani V.* [7]).

Отсутствие единой точки зрения на происхождение кометы ШЛ9 показывает, что к настоящему времени остается много вопросов в эволюции кометы, неопределенность момента и механизма захвата кометы на данную орбиту.

Д. Кэри и Л. Донн [8] сделали вероятностную статистику эволюции комет, включающую варианты: долговременная юпитероцентри-

ческая орбита, разрушение ядра при тесном сближении с Юпитером, падение на Юпитер после одного витка вокруг него. Авторы получили следующие результаты. Статистика показывает что, если кометы проходят вблизи Юпитера на расстоянии меньшем 2.4 его радиуса, то одна из 15-ти будет захвачена на юпитероцентрическую орбиту. Около трех процентов из них распадается и 98% немедленно падают на Юпитер. Вероятность повторного сближения с планетой очень мала. В основном, с момента захвата до падения на планету, комета совершает несколько оборотов. Только в одном из 112 случаев столкновения комета была спутником Юпитера более 50 лет. Объекты километрового радиуса сталкиваются с Юпитером примерно раз в 30–500 лет с наиболее вероятным интервалом в 240 лет. Кометы, находящиеся на орбите спутника Юпитера, сталкиваются с ним раз в  $(0.2 - 3.5) \cdot 10^3$  лет.

Целью данной работы является построение теории эволюции кометы ШЛ9 до 1992 года.

На первом этапе этой работы были оценены значения сил, действующих на комету вблизи Юпитера.

## 2. Силы, определяющие движение кометы в окрестности Юпитера

Траектория движения кометы определялась численным интегрированием уравнений движения методом Эверхарта. С целью повышения точности интегрирования уравнения движения кометы были модифицированы по методу Энке [9]. Этот метод предполагает нахождение не самих возмущенных координат, а их возмущений (отклонение от кеплеровского движения). Уравнения движения кометы имеют вид

$$\delta \ddot{r} = \sum_j \bar{R}_j, \quad (1)$$

где  $r$  — юпитероцентрический вектор положения кометы,  $\bar{R}_j$  — возмущающие ускорения,  $j$  — количество учитываемых возмущающих сил.

Для того, чтобы оценить значимость сил, включаемых в уравнения движения кометы были проделаны следующие вычисления. Были выбраны два момента положения кометы на орбите — в самой удаленной точке относительно Юпитера и в момент перигея. Рассмотрены следующие возмущения:

— возмущения от больших планет и Солнца ( $j=2$ ),

—возмущения от галилеевых спутников ( $j=3$ ),  
—возмущения от несферичности гравитационного поля Юпитера ( $j=4$ ),  
—релятивистские поправки, которые находятся решением уравнения Шварцшильда для движения пробной частицы в сферически-симметричном гравитационном поле Юпитера ( $j=5$ ),  
—возмущающее ускорение в движении фрагмента, вызванного притяжением ядра кометы ( $j=6$ ),  
—реактивное ускорение вследствие сублимации молекул с поверхности ядра кометы ( $j=7$ ).

Рассмотрим каждое из перечисленных возмущающих ускорений более подробно.

$j=1$ .  $\bar{R}_1$  — разность ускорений от центрального тела (Юпитера), действующих на небесное тело, движущееся по возмущенной и невозмущенной орбитам [9]:

$$\bar{R}_1 = -\frac{k^2 (q \cdot f(q) \cdot \bar{r}_s - \Delta \bar{r})}{r^3}, \quad (2)$$

где  $q$  и  $f(q)$  определяются по формулам:

$$f(q) = q \frac{3 + 3q + q^2}{1 + (1 + q)^{3/2}}, \quad (3)$$

$$q = \frac{\Delta \bar{r}(t) - 2\bar{r}(t)}{r^2} \Delta \bar{r}(t). \quad (4)$$

$\Delta \bar{r}(t)$  — отклонения возмущенных координат от невозмущенных,  $\bar{r}_s$  — вектор, составленный из координат кометы, определяющих невозмущенную орбиту,  $k^2$  — гравитационная постоянная для Юпитера.

$j=2$ .  $\bar{R}_2$  — возмущения от притяжения больших планет и Солнца, которые определялись по формулам:

$$\bar{R}_2 = -k^2 \sum_i m_i \left( \frac{\bar{r}_i - \bar{r}}{\Delta_i^3} - \frac{\bar{r}_i}{r_i^3} \right), \quad (5)$$

где  $m_i$  и  $\bar{r}_i$  — массы и векторы положения Солнца и больших планет,  $\Delta_i$  — расстояние между кометой и Солнцем или планетой. Координаты девяти больших планет вычислялись по американской эфемериде DE200 [10].

$j=3$ .  $\bar{R}_3$  — возмущения от притяжения четырех галилеевых спутников Юпитера.  $\bar{R}_3$  рассчитывались по формулам аналогичным (5),

где  $m_i$  и  $\bar{r}_i$  — массы и векторы положения спутников,  $\Delta_i$  — расстояние между кометой и соответствующим спутником. В вычислениях координат четырех галилеевых спутников — Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто — использовался программный комплекс "ЭРА"[11].

j=4.  $\bar{R}_4$  — возмущения от несферичности Юпитера. Планета аппроксимировалась сфероидом с полярным радиусом = 66000 км и экваториальным радиусом = 71000 км. Возмущающий потенциал от сжатия Юпитера в системе координат  $OXYZ$ , связанных с главными осями инерции, дается разложением:

$$V = \frac{k^2 M}{r} \sum_{k=2}^{\infty} C_{k,0} \left(\frac{R}{r}\right)^k P_k\left(\frac{z}{r}\right), \quad (6)$$

где  $P_k$  — полиномы Лежандра,  $R$ ,  $M$ ,  $C_{k,0}$  — экваториальный радиус, масса и зональные коэффициенты потенциала притяжения Юпитера. Суммирование велось только по четным значениям  $k$ , т.к.  $C_{k,0} = 0$  для нечетных  $k$ .

Проекции ускорения от несферичности Юпитера вычислялись по формулам [12]:

$$\begin{aligned} R_{4x} &= \frac{3}{2} k^2 C_{2,0} R_e^2 M \frac{x}{r^5} \left( 5 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{5}{8} k^2 C_{4,0} R_e^4 M \frac{x}{r^7} \left( 70 \frac{z^4}{r^4} - 42 \frac{z^2}{r^2} + 3 \right), \\ R_{4y} &= \frac{3}{2} k^2 C_{2,0} R_e^2 M \frac{y}{r^5} \left( 5 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{5}{8} k^2 C_{4,0} R_e^4 M \frac{y}{r^7} \left( 70 \frac{z^4}{r^4} - 42 \frac{z^2}{r^2} + 3 \right), \\ R_{4z} &= \frac{3}{2} k^2 C_{2,0} R_e^2 M \frac{z}{r^5} \left( 5 \frac{z^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{5}{8} k^2 C_{4,0} R_e^4 M \frac{z}{r^7} \left( 63 \frac{z^4}{r^4} - 70 \frac{z^2}{r^2} + 15 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

j=5.  $\bar{R}_5$  — релятивистские поправки. В изотропной системе координат они определялись соотношением [13]:

$$\bar{R}_5 = \frac{kM}{c^2 r^3} \left( \frac{4k^2 M}{r} \bar{r} - |\dot{\bar{r}}|^2 \bar{r} + 4(\dot{\bar{r}}\bar{r})\dot{\bar{r}} \right). \quad (8)$$

j=6.  $\bar{R}_6$  — возмущающие ускорения, которые возникают в движении фрагмента из-за притяжения ядра кометы. Величина данного ускорения вычислялась по формуле:

$$\bar{R}_6 = -\frac{k^2 m}{\Delta^3} \bar{r}_c, \quad (9)$$

где  $m$  — масса ядра кометы,  $\bar{r}_c$  — кометоцентрический вектор положения фрагмента,  $\Delta$  — расстояние между центрами инерции фрагмента и ядра. Ускорение

вычислено при условии его максимума — когда фрагмент и комета соприкасаются. Радиус фрагмента считался равным  $1/20$  радиуса ядра.

$j=7$ .  $\bar{R}_7$  — реактивное ускорение в движении фрагмента кометы, вызванное сублимацией молекул с поверхности ядра из-за нагрева прямыми солнечными лучами. Величина данного ускорения для шести основных веществ (кроме водяного льда), входящих в состав ядра, в направлении радиус-вектора "комета-Солнце" рассчитывалась по формуле [12]:

$$\bar{R}_7 \cdot m_f = -\mu N \bar{r} V_r \pi h^2, \quad (10)$$

где  $\mu$  — молекулярный вес сублиманта,  $N$ ,  $V_r$  — соответственно количество и радиальная компонента скорости сублимирующих молекул,  $\bar{r}$  — единичный вектор, совпадающий с направлением на Солнце. Предполагалось, что все сублимирующие молекулы вносят свою долю в ускорение. Скорость истечения молекул,  $V$ , является функцией гелиоцентрического расстояния кометы. На расстоянии 5 а.е. она примерно равна 300 м/с. Для разных веществ  $V$  считалась одинаковой. Радиус фрагмента,  $h$ , считался равным 300 м, плотность  $0.6 / \text{г}^3$ , масса фрагмента  $m_f = 6.78 \cdot 10^{13}$  г. Ускорение рассчитывалось в предположении, что испарение молекул происходит с поверхности площадью  $\pi h^2$ . Данные о газопроизводительности,  $N$ , этих веществ приведены в работе [14].

Табл. 1 содержит модули ускорений от всех вышеперечисленных возмущающих сил (в третьем-четвертом столбцах). Данные ускорения были вычислены на два момента: 2448811.3 TDT (момент сближения кометы с Юпитером на расстояние 93000 км от центра планеты) и 2449300.5 TDT (апогей орбиты кометы). В первом столбце таблицы дан номер возмущающего ускорения в соответствии с вышеприведенным описанием; во втором столбце — источник возникновения соответствующего ускорения.

Результаты вычислений, приведенные в таблице, показывают, что наиболее велики возмущения от Солнца, спутников Юпитера, 2 гармоники разложения потенциала притяжения. Для построения точной орбиты кометы необходим учет релятивистской поправки, особенно при тесных сближениях с планетой. Достаточно велико негравитационное ускорение, вызванное сублимацией вещества из-за разогрева ядра излучением Солнца. Модельная задача по исследованию влияния ускорения от ядра на движение фрагментов кометы решалась в работе [15], где сделан вывод о его незначимости. Возмущения со стороны 4 гармоники и некоторых больших планет не велики.



Таблица 1.

j	Момент	перийовий	апойовий
2	2гармоника	$8.0 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-13}$
	4гармоника	$1.1 \cdot 10^{-13}$	$2.1 \cdot 10^{-20}$
3	Солнце	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$
	Меркурий	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$1.8 \cdot 10^{-12}$
	Венера	$3.2 \cdot 10^{-11}$	$2.9 \cdot 10^{-11}$
	Земля	$2.2 \cdot 10^{-11}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$
	Марс	$4.8 \cdot 10^{-12}$	$2.1 \cdot 10^{-12}$
	Сатурн	$4.5 \cdot 10^{-10}$	$3.9 \cdot 10^{-10}$
	Уран	$3.2 \cdot 10^{-11}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$
	Нептун	$1.7 \cdot 10^{-11}$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
4	Плутон	$3.5 \cdot 10^{-15}$	$3.0 \cdot 10^{-15}$
	Ио	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-6}$
	Европа	$3.7 \cdot 10^{-7}$	$3.5 \cdot 10^{-7}$
	Ганимед	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-7}$
5	Каллисто	$6.5 \cdot 10^{-8}$	$9.9 \cdot 10^{-8}$
	Рел. поправки	$2.3 \cdot 10^{-12}$	$4.0 \cdot 10^{-17}$
6	Ядро кометы	$4.1 \cdot 10^{-10}$	—
7	Угл. газ	$9.8 \cdot 10^{-9}$	те же, что и в перийовии
	Метан	$1.4 \cdot 10^{-8}$	
	Аммиак	$4.7 \cdot 10^{-9}$	
	Азот	$2.6 \cdot 10^{-8}$	
	Угар. газ	$2.3 \cdot 10^{-8}$	
	Синильная к-та	$4.1 \cdot 10^{-9}$	

В уравнениях движения кометы ШЛ9 с целью достижения максимальной точности вычислений учитывались возмущения  $\bar{R}_j$  ( $j=1,...,5$ ). Негравитационные ускорения учитывались только тогда, когда это оговорено в тексте.

### 3. Параметры орбиты фрагмента Н

Поскольку комета была открыта через несколько месяцев после распада, на основе полученных позиционных наблюдений мы можем с достаточной точностью построить только траектории движения ее фрагментов на период 1993–1994 годы.

Расположение фрагментов на орбите на определенные моменты времени в период наблюдений приведено на рис. 1.

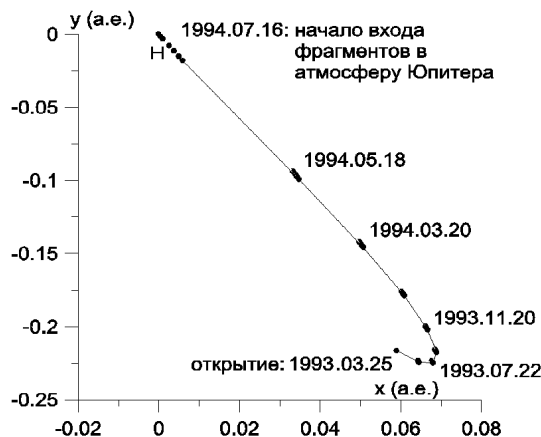


Рис. 1. Расположение фрагментов кометы ШЛ9 на орбите в период наблюдений.

Вычисления мы делали на основе предположения, что комета двигалась по траектории, полученной интегрированием назад одного из ее фрагментов. Фрагменты кометы были названы буквами латинского алфавита в порядке их входа в атмосферу Юпитера [5]. В качестве центрального был выбран фрагмент Н. Положение фрагмента Н соответствует середине цепочки фрагментов (его положение указано на рис. 1). Критерий выбора — близость координат и компонент скорости фрагмента Н к координатам и компонентам скорости центра инерции ядра в момент распада [15].

Система элементов орбиты фрагмента Н, полученная Б. Марсденом и приведенная им в MPC, была нами улучшена дифференциальным методом на основе 203-х позиционных наблюдений. В качестве начальной эпохи, на которую проводилось улучшение, был выбран момент  $T = 2449300.5 \text{ TDT} = 1993.11.09$ . Кроме позиционных наблюдений с целью повышения точности определения начальных параметров в систему условных уравнений были включены уравнения, в которых в качестве наблюдений использованы наблюдаемый момент падения. Схема вычисления дифференциальных коэффициентов и правой части уравнения по временным наблюдениям приведена в работе [15]. Наблюденный [5] и вычисленный моменты падения фрагмента Н на 18 июля 1994 года приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Наблюденный момент падения	$19^h 31^m 59^s$
Вычисленный момент падения	$19^h 32^m 00^s$

Компоненты вектора состояния и их ошибки в юпитероцентрической экваториальной системе координат на момент Т, а также ошибка единицы веса в секундах дуги и матрица коэффициентов корреляции между данными компонентами приведены в табл. 3.

Таблица 3. Компоненты вектора состояния,  $\bar{X}_0$ , фрагмента Н на эпоху Т=2449300.5 TDT.

$x_0$	$-5.757917328 \cdot 10^{-2}$	$6.43 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$y_0$	0.280821549	$1.42 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$z_0$	-0.111592902	$1.64 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$\dot{x}_0$	$4.405555294 \cdot 10^{-5}$	$4.21 \cdot 10^{-8}$	а.е./сутки
$\dot{y}_0$	$-3.806591573 \cdot 10^{-4}$	$8.25 \cdot 10^{-9}$	а.е./сутки
$\dot{z}_0$	$9.360961648 \cdot 10^{-5}$	$9.16 \cdot 10^{-9}$	а.е./сутки
$\sigma_0$	0.582		сек. дуги

Матрица корреляционных коэффициентов

	$x_0$	$y_0$	$z_0$	$\dot{x}_0$	$\dot{y}_0$	$\dot{z}_0$
$x_0$	1.00					
$y_0$	0.36	1.00				
$z_0$	0.20	0.81	1.00			
$\dot{x}_0$	-0.55	0.50	0.51	1.00		
$\dot{y}_0$	-0.20	0.62	0.66	0.87	1.00	
$\dot{z}_0$	-0.11	0.68	0.54	0.75	0.83	1.00

Следующим этапом работы был поиск вероятностных областей движения кометы до ее сближения с Юпитером в 1992 году.

## 4. Алгоритм выбора начальных данных

Для определения начальных данных был выбран метод отображения области случайных значений вектора состояния  $\bar{X}_0$  на моменты, предшествующие сближению кометы с Юпитером. Операция отображения осуществлялась путем выбора достаточно плотного пучка траекторий. Оператором отображения являлась система дифференциальных уравнений движения. Для того, чтобы учесть корреляционные связи при выборе начальных данных для формируемого пучка траекторий, была применена процедура приведения вектора состояния фрагмента Н к простейшему нормальному вектору. Для этого вектор

состояния интерпретировался, как нормальный случайный вектор с математическим ожиданием  $X_0$  и корреляционной матрицей  $\sigma_0^2 A^{-1}$ . В корреляционной матрице  $\sigma_0$  — средняя ошибка единицы веса,  $A$  — матрица коэффициентов нормальной системы.

Искалось линейное преобразование

$$Y = UX, \quad (11)$$

такое, что  $U^T A U = \Sigma$ , где  $\Sigma$  — диагональная матрица. Преобразование (11) позволяет получить нормальный вектор  $Y$  с диагональной корреляционной матрицей  $\sigma_0 \Sigma^{-1}$ .

Для вычисления матрицы  $U$  использовался метод сингулярных разложений. Описание метода сингулярных разложений и алгоритм вычислений в виде программы SVD на языке Фортран приведены в книге Форсайта и Моулера [16].

Следующим преобразованием

$$Z = \sigma_0^{-1} \Sigma^{-1/2} Y \quad (12)$$

нормальный вектор  $Y$  сводится к нормальному вектору  $Z$  с единичной корреляционной матрицей. Вектор  $Z$  — простейший нормальный вектор, компоненты которого независимы и распределены по нормальному закону с параметрами  $\bar{X}_0$  и 1, где  $\bar{X}_0$  — вектор состояния, компоненты которого приведены в табл. 3 (математическое ожидание), а 1 — единичная дисперсия. Для случайного выбора компонент данного вектора был использован датчик случайных чисел — RANDOM. Эта программа позволяет значения случайной величины, распределенной равномерно на промежутке (0,1). Генерировались 6 значений случайной величины, которые составляли вектор  $\hat{Z}$ . Потом этот вектор отображался на промежутки (-1,1)

$$\bar{Z} = -\bar{1} + 2\hat{Z} \quad (13),$$

где  $\bar{1}$  — единичный вектор-столбец.

Затем обратным преобразованием

$$\bar{X} = N \cdot \sigma_0 \cdot (\Sigma^{-1/2} U^T A)^{-1} \bar{Z} + \bar{X}_0 \quad (14)$$

получались начальные данные для пучка траекторий.

Для того, чтобы учесть тот факт, что с вероятностью 0.016 ( $0.5^6 = 0.016$  по правилу перемножения вероятностей для случайных величин [17]) начальные данные лежат в эллипсоиде ошибок с полуосями пропорциональными  $\sigma$  и с вероятностью 0.982 ( $0.997^6 = 0.982$ ) — в эллипсоиде с полуосями пропорциональными  $3\sigma$ , в формулу (14) был введен коэффициент  $N$ , который брался равным 1 или 3. Таким образом, рассматривался разброс в начальных данных в интервале 1 и  $3\sigma$ .

## 5. Гистограмма распределения трех вариантов эволюции кометы

Для статистического исследования было построено более тысячи орбит. Уравнения движения интегрировались численно методом Эверхарта 11-ого порядка [18]. В правой части учитывалось гравитационное притяжение Солнца, девяти больших планет, четырех галилеевых спутников Юпитера, возмущения от несферичности гравитационного поля Юпитера и релятивистские поправки. Интегрирование заканчивалось при выполнении одного из трех поставленных условий.

1. Комета находится на орбите спутника Юпитера до 1900 года. Дальнейшее интегрирование нам представляется нецелесообразным, так как накопление ошибок интегрирования ведет к недостоверности результата. В данном случае интегрирование прерывалось по времени с соответствующей пометкой. В дальнейшем реализации данного условия при статистическом исследовании будем условно называть "вариант 1".

2. Комета в момент времени  $t_i$  сближалась с Юпитером на расстояние менее 70000 км от центра планеты. В данном случае интегрирование заканчивалось с сообщением, что в момент  $t_i$  комета упала на Юпитер. Реализацию этого условия при интегрировании будем называть "вариант 2".

3. В процессе эволюции орбита комета уходила из сферы влияния Юпитера и переходила на гелиоцентрическую орбиту. Фиксировался момент времени, на котором расстояние комета–Юпитер становилось равным 1 а.е и интегрирование заканчивалось. Если выполнялось данное условие, то такую эволюцию орбиты кометы в дальнейшем будем называть "вариант 3".

Был проведен статистический анализ для двух случаев:  $N=1$  и  $N=3$ .

Всего было построено 1050 орбит. Полученные результаты приведены на четырех гистограммах. Для построения первых двух гистограмм начальные данные выбирались при  $N=1$  (рис. 2а,б), для другой — при  $N=3$  (рис. 3а,б). Количество реализаций варианта 1 на гистограммах не нанесено. Вычисления показали, что для  $N=1$  комета оставалась спутником Юпитера 592 раза, при  $N=3$  — 178 раз (всего 770 траекторий или 73% от вычисленных орбит).

На каждом из рисунках 2 и 3 приведены по два варианта окончания интегрирования. Все варианты описаны выше. Ось ординат на всех гистограммах определяет количество реализаций вариантов 2 и 3 в соответствующие годы. Серые столбики на рис. 2б, рис. 3б определяют количество траекторий кометы по годам, при которых комета падает на Юпитер (84 траектории — 8%). Клетчатые столбики на рис. 2а, 3а показывают число траекторий по годам, в моменты, когда расстояние комета–Юпитер становится больше 1 а.е. (196 траекторий — 19%).

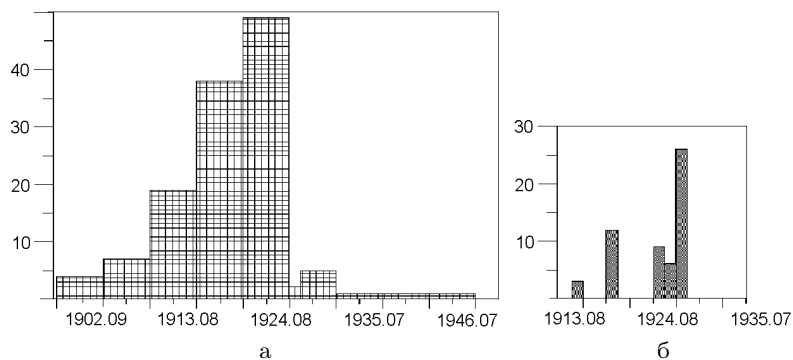


Рис. 2а,б. Распределение количества реализации варианта 2 (рис. 2б) и варианта 3 (рис. 2а) эволюции кометы по годам. Начальные данные вычислены для  $N=1$ .

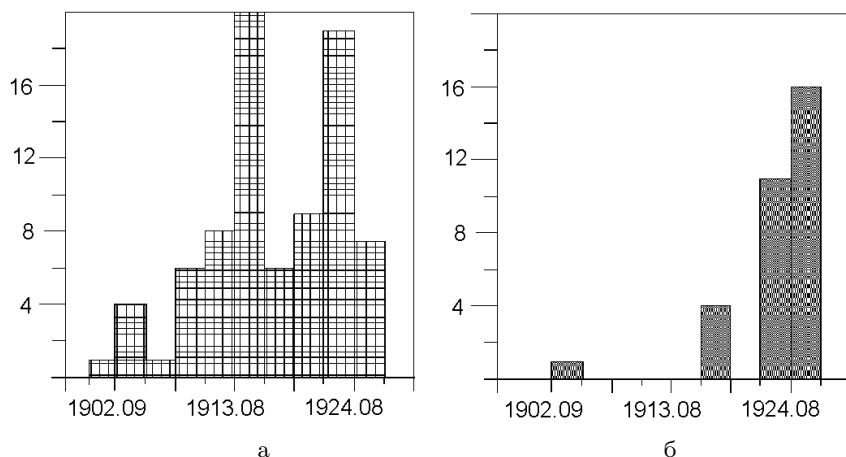


Рис. 3а,б. Распределение количества реализации варианта 2 (рис. 3б) и варианта 3 (рис. 3а) эволюции кометы по годам. Начальные данные вычислены для  $N=3$ .

Полученная статистика определяет направления дальнейших исследований. Нами были рассмотрены все три варианта эволюции. Определение траектории движения кометы до распада ее ядра проводилось численным интегрированием. Предполагалось, что вектор состояния фрагмента  $N$  на определенный момент времени соответствует вектору состояния центра инерции родительского ядра кометы на тот же момент.

Исследование трех вариантов эволюции орбиты проводилось на основе следующих начальных данных:

Вариант 1. В качестве начальных данных для интегрирования был взят вектор состояния фрагмента Н на эпоху 2449300.5 TDT, приведенный в табл. 3 во втором столбце.

Вариант 2. В качестве начальных данных для интегрирования был взят вектор состояния варьированной орбиты кометы ШЛ9 на эпоху 2449300.5 TDT, приведенный в табл. 8 во втором столбце таблицы.

Вариант 3. Тщательное исследование данного варианта эволюции не проводилось, т.к. он, вероятнее всего, реализуется вследствие накопления ошибок интегрирования.

## 6. Исследование траектории движения кометы на орбите спутника Юпитера с 1700 по 1992 годы

Результаты вычислений показали, что с наибольшей вероятностью с 1900 по 1992 годы комета ШЛ9 находилась на устойчивой орбите спутника Юпитера. Было проведено численное исследование такой орбиты на более длинном промежутке времени: 1700 – 1992 годы. Наши расчеты показали, что все это время комета была спутником Юпитера. В табл. 4 приводятся элементы кометы, находящейся на орбите спутника Юпитера до 1900 года.

Таблица 4. Элементы орбиты фрагмента Н.

Дата	$\omega$	$\Omega$	$i$	$e$	q
1993 11 8	49.78	255.72	63.14	0.9963	0.0006
1988 11 8	37.94	292.14	91.30	0.6504	0.0572
1978 11 8	70.82	297.40	97.09	0.1073	0.1453
1968 11 8	140.20	294.91	92.21	0.2000	0.1269
1958 11 8	134.22	318.35	76.26	0.9386	0.0102
1948 11 8	40.09	148.95	94.08	0.3836	0.0984
1938 11 8	100.83	147.22	99.56	0.0595	0.1439
1928 11 8	138.98	150.42	90.50	0.5345	0.0750
1918 11 8	39.96	348.65	82.29	0.7842	0.0374
1908 11 8	77.252	359.94	96.71	0.1184	0.1496

По этим элементам построена траектория движения кометы в данный период. На рис. 4 приведена проекция траектории движения кометы на плоскость ХУ в юпитероцентрических координатах. Пунктирной линией обозначена гравитационная сфера Хилла для Юпитера (радиус сферы Хилла = 0.34697 а.е. [19]).

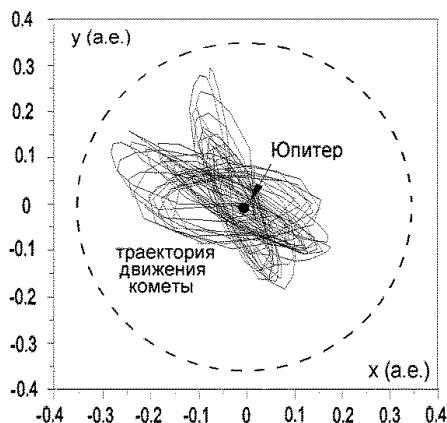


Рис. 4. Траектория движения кометы в период с 1900–1992 годы.

Юпитер обладает многочисленным семейством комет, отличительной особенностью которых является высокая вероятность сближений с ним. Нами была предпринята попытка найти возможную генетическую связь кометы ШЛ19 с кометами семейства Юпитера.

### 6.1. Исследование возможной генетической связи кометы ШЛ19 с кометами семейства Юпитера

В эволюции орбит большого количества комет основную роль играют возмущения от Юпитера. Почти 90% короткопериодических комет относятся к семейству Юпитера. Большинство данных объектов имеет орбиту с малым наклоном и небольшим эксцентриситетом и период обращения менее 20-ти лет [20]. Для исследования возможной связи кометы ШЛ19 с кометами семейства Юпитера были выбраны две из них: Отерма и Герелс 3.

Для нашей работы кометы Отерма и Герелс 3 были выбраны по следующим причинам:

1. они имели тесные сближения и сходные параметры орбит с кометой Шумейкеров–Леви 9. Комета Герелс 3, вероятнее всего, находилась на временной спутниковой орбите Юпитера в период 1970–1973 годы.

2. кометы Отерма, Герелс 3 и ШЛ19 имеют близкое значение постоянной Якоби (табл. 5) во время взаимных сближений. Достаточная близость этих постоянных является необходимым (но недостаточным) условием тождественности двух комет. Постоянная Якоби для кометы ШЛ19  $= 1.162 \cdot 10^{-4}$ .

На основе имеющихся наблюдений были получены улучшенные системы начальных параметров в прямоугольных экваториальных координатах на моменты времени, приведенные в табл. 5 (2-ая строка), и минимальные расстояния комета–Юпитер на данный промежуток времени (табл. 6).



Таблица 5.

Объект	Отерма	Герелс 3
T (эпоха)	2437880.5 TDT	2446200.50 TDT
$x$ (а.е.)	4.321288747	-1.247090536
$y$	-1.708084692	2.963416007
$z$	-0.792671647	1.231568074
$\dot{x}$ (а.е./сутки)	$13.34810922 \cdot 10^{-3}$	$-9.235191408 \cdot 10^{-3}$
$\dot{y}$	$6.07861603 \cdot 10^{-3}$	$-3.315473883 \cdot 10^{-3}$
$\dot{z}$	$1.90122198 \cdot 10^{-3}$	$-1.575693499 \cdot 10^{-3}$
Постоянная Якоби	$1.201 \cdot 10^{-4}$	$1.202 \cdot 10^{-4}$

Таблица 6. Сближения комет с Юпитером до 1900 года.

	Дата	Расстояние
Отерма	2438131.5	0.09 а.е.
Герелс 3	2441768.5	0.035 а.е.
	2440826.5	0.008 а.е.

По этим начальным данным были построены долгосрочные ретроспективные эволюции этих комет с -3000 года до 2000 года. В модели движения комет учитывались возмущения от девяти больших планет. Уравнения движения интегрировались методом Эверхарта. Нас интересовала устойчивость орбит и взаимные сближения комет друг с другом, а также, сближения комет с Юпитером и Сатурном (на расстояние меньшее 1 а.е.). В результате вычислений оказалось, что каждая из этих комет меняла принадлежность к семейству большой планеты.

В результате исследования траекторий движения этих двух комет и кометы ШЛ9 (на интервале времени 1900–1992 годы) были получены минимальные расстояния между ними. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Объекты	Дата	$\Delta R$ (а.е.)
Отерма–ШЛ9	2438194.5	$3.3071 \cdot 10^{-2}$
Герелс 3–ШЛ9	2440814.5	$8.9191 \cdot 10^{-2}$

Комета Отерма не наблюдалась с 1958 по 2001 год, но наблюдения 2001 года хорошо включились в процесс улучшения. Это говорит о том, что в эволюции данной кометы ничто не указывает на событие, ведущее к скачкообразному изменению параметров орбиты (например, распад с большим сдвигом центра инерции или с изменением скорости). Полученная величина взаимного

расстояния между кометами при сближении являлась единственным возможным критерием их тождественности. Мы провели статистическое исследование подобное тому, что мы делали при построении диаграмм 2а,б, 3а,б. Начальные данные для численного интегрирования выбирались аналогично. Результатом исследования являлось минимальное расстояние между варьированной орбитой кометы ШЛ9 и кометами Отерма и Герелс 3 на промежутке времени 1900–1992 годс. Существенного сближения комет получить не удалось. Проведенное нами исследование показало, что генетическая связь кометы ШЛ9 с кометами Отерма и Герелс 3, вероятнее всего, отсутствует.

## 7. Исследование возможной генетической связи кометы со скоплениями астероидов "Греки" и "Троянцы"

На рис. 2а,б, рис. 3а,б видно, что вероятен захват кометы на орбиту спутника Юпитера до 1925 года. Было проведено исследование одной из таких орбит для варьированной орбиты кометы ШЛ9, параметры орбиты которой на эпоху 2449300.5 TDT приведены в табл. 8.

Таблица 8.

$x$	$-5.75738090 \cdot 10^{-2}$	а.е.
$y$	0.28082669	а.е.
$z$	-0.11158920	а.е.
$\dot{x}$	$4.46659609 \cdot 10^{-5}$	а.е./сутки
$\dot{y}$	$-3.80656015 \cdot 10^{-4}$	а.е./сутки
$\dot{z}$	$9.35943028 \cdot 10^{-5}$	а.е./сутки

С 1925 по 1992 годы комета имела три тесных сближения с Юпитером ( $\Delta R_{jup}$ ). Даты и расстояния сближений приведены в табл. 9.

Таблица 9.

Юлианская дата	Год	месяц	$\Delta R_{jup}$ (а.е.)
2424292.50	1925	05	$0.338064 \cdot 10^{-2}$
2435872.50	1957	02	$0.614426 \cdot 10^{-2}$
2448811.50	1992	07	$0.225337 \cdot 10^{-2}$

Гелиоцентрические элементы этой орбиты приведены в табл. 10. Элементы соответствуют моменту времени, когда в процессе численного интегрирования юпитероцентрическое расстояние кометы становилось равным 2 а. е.

Таблица 10.

Дата	$r$	$\omega$	$\Omega$	$i$	$e$	$a$	$q$
1920/11/06.0	2 а.е.	339.83	319.02	5.183	0.1756	6.34	5.230

На орбите Юпитера в Лагранжевых точках находятся группы астероидов. Они получили название "Греки" и "Троянцы". "Греки" и "Троянцы"— это тела размерами менее 300 км [21]. Гравитационное притяжение Солнца и Юпитера в этих точках уравнивается центробежной силой, что позволяет объектам находиться на стабильных орбитах в период, сравнимый с возрастом Солнечной системы. По оценке наблюдателей к настоящему времени открыто около 12% от общего числа этих объектов. Их расположение в системе Солнце–Юпитер показано на рис. 5 [21].

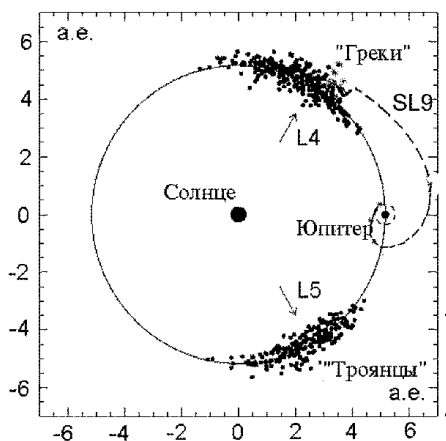


Рис. 5. Вероятная эволюция орбиты кометы ШЛ9.

Там же, пунктирной линией, соединяющей Юпитер и систему "Греков" приведена вероятная орбита кометы Шумейкеров–Леви 9 до захвата на орбиту спутника Юпитера примерно в 1925 году. Прерывистая линия вокруг Юпитера показывает область Хилла.

Взаимное расположение кометы и Юпитера относительно Солнца говорят о том, что комета могла прийти из скопления астероидов "Греки". В работе [21] приведены элементы основных астероидов, находящихся в треугольных точках либрации системы Солнце–Юпитер–объект. В табл. 11 приведены кеплеровы элементы орбит астероидов из скопления "Греков" которые наиболее близки к элементам орбиты кометы ШЛ9:

Таблица 11. Элементы орбит астероидов системы "Греки—Троянцы".

Название объекта	q	$\omega$	$\Omega$	i	e	a
(659)Nestor	4.627	340.0	351.0	4.5	0.113	5.216
2002 CU152	4.001	260.6	359.6	7.9	0.224	5.156
2002 CH109	3.861	278.8	346.4	7.7	0.247	5.128
2002 CF79	4.382	241.0	353.8	7.2	0.161	5.223
2002 CQ78	3.629	286.5	340.7	10.0	0.284	5.069
2002 CT22	4.317	298.2	337.4	7.6	0.123	4.923
1997 SG14	4.544	323.8	359.2	10.3	0.155	5.377

Относительное сходство элементов орбит кометы и некоторых объектов данных семейств позволяют предположить, что одним из вариантов эволюции кометы был ее приход из данного скопления астероидоподобных тел.

## 8. Исследование эпиковского захвата как одного из вариантов эволюции орбиты кометы Шумейкеров–Леви 9

### 8.1. История и развитие эпиковской теории захвата

Эпиковская теория захвата — распад твердого тела из-за приливного действия большой планеты и последующий захват части распавшегося объекта на планетоцентрическую орбиту. Он обсуждался в работах о происхождении Луны, где рассматривалась гипотеза о приливном разрушении планетоида при тесном сближении с Землей [22]. Эта идея впоследствии была развита в работах, в которых исследовались обстоятельства сближений комет с большими планетами (в основном, с Юпитером). Изменения элементов орбиты частицы на траекториях до и после сближения исследованы в работе А.Карузи [23].

Кратко рассмотрим механизм эпиковского захвата. Построение траектории движения частицы до и после столкновения с большой планетой можно сделать, рассмотрев задачу двух тел. Представим, что комета — это тело единичной массы, движущееся под воздействием центральной силы. Основные теоремы механики дают четыре первых интеграла этих уравнений: три интеграла площадей и интеграл энергии. Интеграл энергии записывается в следующем виде:

$$h = \frac{2}{r_0} - \frac{V^2}{k^2}, \quad (15)$$

где  $V$  — модуль скорости кометы,  $r$  — планетоцентрическое расстояние центра инерции кометы,  $h$  — кеплеровская постоянная энергии. Рассмотрим динамические характеристики фрагмента, расположенного в момент распада тела на расстоянии  $r = r_0 - \Delta r$  от Юпитера, где  $\Delta r$  — величина, определяющая сдвиг

центра инерции ядра в радиальном направлении. Будем считать, что скорость центров всех фрагментов кометы в момент распада ее ядра одинакова.

Определим знак постоянной энергии для выбранного фрагмента. Интеграл энергии для него равен:

$$h = \frac{2}{r_0 - \Delta r} - \frac{V^2}{k^2}. \quad (16)$$

Преобразуем уравнение (16) к следующему виду:

$$h = \frac{2}{r_0} \left(1 - \frac{\Delta r}{r_0}\right)^{-1} - \frac{V^2}{k^2}. \quad (17)$$

Выражение в скобках можно представить в виде ряда, ограничившись только первым членом разложения в виду малости  $\frac{\Delta r}{r}$ . Получаем окончательное выражение:

$$h = \frac{2}{r_0} - \frac{V^2}{k^2} + \frac{2\Delta r}{r_0^2}. \quad (18)$$

Разность первых двух членов уравнения (18) равна 0, т.к. центр инерции кометы до распада двигался по параболической орбите и, следовательно, для нее  $h = 0$ .  $h$  — кеплерова энергия, которая определяется формулой:  $h = a^{-1}$ , где  $a$  — большая полуось орбиты.

Последнее уравнение показывает, что фрагмент, находящийся на более близком расстоянии от Юпитера, чем центральный, имеет положительную кеплеровскую энергию, и имеется вероятность его захвата на эллиптическую планетоцентрическую орбиту.

Возможность эпиковского захвата рассматривалась в работе В. Батло [24] при изучении эволюции комет семейства Юпитера. Рассмотренная им невозмущенная задача комета – Юпитер показала, что около 13% комет могло быть захвачено на более или менее долговременную спутниковую орбиту вследствие рассмотренного выше механизма. Давыдов [6] рассмотрел упрощенную модель движения кометы ШЛ9 и сделал вывод о возможности такого варианта эволюции.

## 8.2. Применение теории захвата к движению кометы ШЛ9

Эпиковский механизм захвата предполагает следующий вариант развития событий до и после сближения с Юпитером. До захвата комета находилась на гелиоцентрической орбите. В 1992 году она сблизилась с Юпитером и распалась. Часть фрагментов, находящаяся ближе к центру планеты перешла на орбиту спутника Юпитера, остальные должны были двигаться по параболическим и гиперболическим орбитам относительно Юпитера. Первые фрагменты были открыты в марте 1993 года и в июле 1994 года сгорели в атмосфере планеты. Целью нашего исследования было определение условий распада, при

которых мог осуществиться эпиковский захват. Рассматривалось юпитероцентрическое движение кометы. В задаче учитывались возмущения со стороны Солнца, больших планет, галилеевых спутников, и несферичности Юпитера. Уравнения движения интегрировались численно методом Эверхарта. Предполагалось, что траектория движения кометы до и после распада определяется вектором состояния фрагмента Н. Моментом распада считался момент прохождения фрагментом Н перигея орбиты  $t_0 = 2448811.388$  TDT; компоненты положения и скорости кометы в момент распада определялись соответствующими компонентами вектора состояния фрагмента Н на данный момент. Эти данные приведены в табл. 3.

Наше исследование состояло из двух этапов.

На первом этапе находились начальные условия, при которых комета при интегрировании назад уходила бы на гелиоцентрическую орбиту сразу, не находясь на спутниковой орбите. Для поиска таких начальных данных изменялось положение центра инерции родительского ядра по радиус-вектору в направлении противоположном Юпитеру. Начальные данные для интегрирования выбирались следующим образом. Компоненты вектора скорости считались равными компонентам скорости Н (табл. 3: 5, 6, 7 строки). К компонентам положения фрагмента Н в момент 2449300.5 TDT добавлялись приращения в направлении противоположном направлению "комета-Юпитер" которые интерпретировались, как изменение положения центра инерции кометы и, соответственно, его размеров. Для каждого приращения положения была построена траектория движения кометы. Искалась минимальная вариация положения, начиная с которого реализовался уход кометы на гелиоцентрическую орбиту. Вычисления показали, что изменение положения, соответствующее радиусу родительского ядра более 40 км, эпиковский механизм захвата может быть осуществлен.

На следующем этапе мы исследовали положение фрагментов друг относительно друга после реализации эпиковского распада. При распаде тела вблизи планеты образуется "цепочка" фрагментов, длина которой зависит от начальных размеров ядра. На рис. 6 приведены траектории движения фрагментов кометы Ш/19, которые наблюдались (сплошная линия) и фрагмента, центр которого находился на расстоянии 40 км от фрагмента Н (пунктирная линия). Положение фрагментов А-W и гипотетического фрагмента приведены на три момента времени: момент распада родительского ядра, момент открытия кометы и момент входа в атмосферу фрагмента А. Положение центрального фрагмента кометы в момент распада (фрагмента Н) обозначено квадратом, положение цепочки фрагментов на второй и третий моменты времени представлено в виде точек. На эти же моменты времени крестиками приведено положение гипотетического фрагмента.

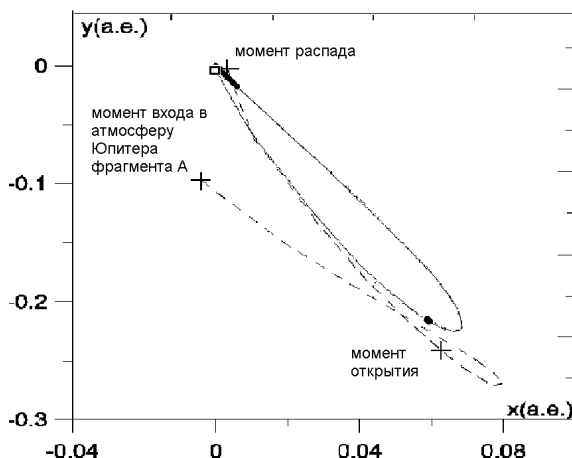


Рис. 6. Траектории движения 12-ти наблюдаемых и одного гипотетического фрагментов кометы в период 1992–1994 гг.

Рисунок показывает, что все фрагменты друг за другом сближаются с Юпитером. Наблюдений сближений каких-либо других фрагментов с Юпитером, кроме фрагментов А–W, не приводилось.

Поскольку, как следует из рис. 6, в момент открытия и в последующие моменты фрагмент, двигающийся по параболической орбите, находится достаточно близко к наблюдаемым фрагментам, то его открытие должно быть неизбежным. Поскольку такого фрагмента не было открыто, вероятность эпиковского захвата как варианта эволюции кометы ШЛ9 мала.

## 9. Негравитационные эффекты в движении комет

### 9.1. Исторический обзор

Можно выделить несколько основных подходов в учете негравитационных сил в численных теориях движения комет.

1. Предполагается, что из-за действия негравитационных сил в момент прохождения через перигелий элементы орбиты изменяются скачкообразно. Из наблюдений вместе с элементами орбиты определяются некоторые дополнительные эмпирические величины, которые характеризуют изменение всех или части элементов от появления к появлению.

2. Учет негравитационных сил, возникающих вследствие испарения вещества с вращающегося сферического ледяного кометного ядра.

Б.Марсден [25] предложил метод для определения компонентов реактивного ускорения. Компоненты вектора ускорения определяются по трем осям, направленным по радиус-вектору "комета–Солнце" трансверсали и нормали к плоскости орбиты кометы. Эти компоненты определяются формулами:

$$F_i = A_i \cdot g(r), \quad (19)$$

где  $A_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) — константы, а  $g(r)$  — функция от гелиоцентрического расстояния кометы. Секанина и Дельзем вывели формулу для вычисления  $g(r)$ , в которой используется зависимость газовой производительности водяного льда от гелиоцентрического расстояния кометы.

Метод Секанины–Марсдена оказался более удобным и при численных расчетах, и при изменении физических характеристик модели. Поэтому он широко используется при построении численных теорий движения комет.

## 9.2. Определение величины негравитационного ускорения в движении кометы ШЛ9 по наблюдениям ее фрагментов

Количественно связь между величиной негравитационного ускорения, гелиоцентрическим расстоянием и физическими характеристиками ядра была установлена в работах Марсдена, Секанины, Дельземма [25]. В нашей работе рассматривается движение кометы, находящейся на спутниковой орбите Юпитера. На расстоянии 5 а.е. сублимацию водяного льда можно считать незначительной [15]. Мы не можем пользоваться моделью Марсдена–Секанины для определения компонент негравитационного ускорения при построении орбиты кометы ШЛ9, так как она описывает сублимацию водяного льда с поверхности кометы под действием Солнечного излучения.

Мы рассмотрели модель движения кометы ШЛ9, в которой, кроме гравитационных сил, было включено негравитационное ускорение от Юпитера. Определение компонентов негравитационного ускорения делалось по аналогии с методом Марсдена по формуле (19), но функции  $g(r)$  была равна:  $g(r) = \frac{1}{r^n}$ , где  $r$  — юпитероцентрическое расстояние кометы. Постоянные коэффициенты  $A_i$  определялись из улучшения орбиты по имеющимся наблюдениям фрагментов вместе с их параметрами орбит. Оказалось, что введение негравитационного ускорения как функции вида  $g = A_i \cdot (\frac{1}{r^n})$  позволяет уменьшить ошибку единицы веса при улучшении параметров орбиты разных фрагментов на 0.01–0.04 секунд дуги. Вычисления показали, что надежнее всего определяется трансверсальная компонента ускорения (или коэффициент 2 в формуле (19)). Наименьшая ошибка единицы веса была получена при улучшении семи параметров: шести параметров орбиты и трансверсальной компоненты негравитационного ускорения от Юпитера.

Параметры орбиты фрагмента Н: компоненты положения и скорости, коэффициент  $2 \cdot 10^{-8}$  и ошибки их определения приведены в табл. 12.



Таблица 12. Параметры орбиты фрагмента Н на эпоху  $T=2449300.5$  TDT.

$x$	$-5.75911885 \cdot 10^{-2}$	$8.06 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$y$	0.28082476	$1.67 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$z$	-0.11159251	$2.22 \cdot 10^{-6}$	а.е.
$\dot{x}$	$4.41402055 \cdot 10^{-5}$	$5.46 \cdot 10^{-8}$	а.е./сутки
$\dot{y}$	$-3.80664738 \cdot 10^{-4}$	$9.09 \cdot 10^{-9}$	а.е./сутки
$\dot{z}$	$9.36038352 \cdot 10^{-5}$	$9.10 \cdot 10^{-9}$	а.е./сутки
$A_2$	$-2.34071115 \cdot 10^{-3}$	$9.73 \cdot 10^{-4}$	
$\sigma_0$	0.578		сек. дуги

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что в движении фрагментов кометы Ш/19 могло присутствовать негравитационное ускорение от Юпитера, компоненты которого пропорциональны  $(1/r^2)$ , где  $r$  — юпитероцентрическое расстояние кометы, но его величину из улучшения мы можем определить с достаточно большой ошибкой.

## 10. Заключение

1. Проведено исследование значимости возмущений, определяющих движение кометы в окрестности Юпитера. Были рассмотрены следующие возмущения: от Солнца и больших планет, галилеевых спутников, несферичности гравитационного поля Юпитера, релятивистские поправки, негравитационное ускорение, вызванное сублимацией некоторых веществ, входящих в состав ядра. Представлен алгоритм учета реактивной силы, возникающей вследствие сублимации вещества с поверхности ядра при его разогревании излучением Солнца. Даны рекомендации для выбора системы ускорений, входящих в уравнение движение кометы, для построения траектории ее движения с различной степенью точности.

2. Изложен вероятностно–статистический метод отображения области вероятных значений вектора состояния  $\bar{X}_0$  на моменты, предшествующие сближению кометы с Юпитером. Операция отображения осуществлялась путем выбора достаточно плотного пучка траекторий. Оператором отображения являлась система дифференциальных отображений движения. Для того, чтобы учесть корреляционные связи при выборе начальных данных для формируемого пучка траекторий, была применена процедура приведения вектора состояния фрагмента Н к простейшему нормальному вектору. В разработке метода использовались идеи метода сингулярных разложений. Случайность процесса выбора начальных данных для интегрирования обеспечивалась датчиком случайных чисел. Данным методом по случайным выборкам начальных данных было проинтегрировано 1050 орбит. Построена гистограмма распределения трех вариантов эволюции орбиты кометы по времени до 1900 года. По

результатам, отраженным на гистограммах, получено следующее количество реализаций трех вариантов эволюции: на спутниковой орбите осталось 770 статистических двойников кометы ШЛ9, ушло на гелиоцентрическую орбиту — 196, упало на Юпитера — 84. Эти данные позволили сделать вывод о наиболее вероятном варианте эволюции, при котором комета находилась на орбите спутника Юпитера с 1900 года до момента открытия.

3. Представлены улучшенные системы начальных данных для двух комет семейства Юпитера кометы Отерма и Герелса 3. Построена их ретроспективная эволюция на 5000 лет. Сделана попытка выявления возможной генетической связи между кометой ШЛ9 и этими двумя кометами на основе определения минимальных расстояний между объектами.

4. Исследована возможная генетическая связь кометы ШЛ9 с семействами астероидов "Греки" — "Троянцы". С этой целью был исследован вариант эволюции кометы, при котором захват ее с гелиоцентрической орбиты произошел в 1925 году. Представлена таблица гелиоцентрических элементов кометы до захвата. Составлена таблица элементов орбит астероидов скопления "Греки" наиболее близких к ШЛ9.

5. На основе численной теории движения кометы проанализирована возможность эпиковского захвата как варианта эволюции кометы ШЛ9. Подробно рассмотрен механизм эпиковского захвата и определены динамические характеристики тела при его разрушении, при которых этот захват может осуществиться. Построены траектории движения кометы ШЛ9 в зависимости от положения центра инерции ее родительского ядра. Показано, что эпиковский захват противоречит наблюдательным данным о моментах падения фрагментов в атмосферу Юпитера и, следовательно, маловероятен в данном случае.

5. При улучшении параметров орбит фрагментов выявлено негравитационное ускорение от Юпитера, включение которого в вправые части уравнений движения позволяет уменьшить единицу веса при обработке позиционных наблюдений фрагментов на 0.01–0.04 угловых секунд для разных фрагментов. Сделан вывод, что в движении фрагментов кометы ШЛ9 могло присутствовать негравитационное ускорение от Юпитера, компоненты которого пропорциональны  $1/r^2$ , где  $r$  — юпитероцентрическое расстояние фрагмента.

Автор выражает благодарность Ю.Д.Медведеву и Ю.В.Батракову за внимательное отношение и ценные замечания при подготовке данной статьи.

Работа поддержана грантом РФФИ N.01–02–17078.

## Список литературы

- [1] Sekanina Z., Yeomans D. K. Orbital motion, nucleus precession, and splitting of periodic comet Brooks 2. *Astron. J.*, 1985, **90**, 2335–2352.

- [2] Hill R. Possible jovian impact candidates in the first half of the 20th century. *J. Assoc. Lunar. Planet. Obs.* 1995, **38**, 4.
- [3] Sitarski G. Motion of Comet D/Shoemaker–Levy 9 before the breakup. *Acta Astron.*, 1995, **45**, 2, 419–428.
- [4] Benner L. A. M., McKinnon W. B. On the orbital evolution and origin of comet Shoemaker–Levy 9. *Icarus*, 1995, **118**, 1, 155–168.
- [5] Chodas P. W., Yeomans D. K. The orbital motion and impact circumstances of Comet Shoemaker–Levy 9. personal communication. 1996. 30 pp.
- [6] Давыдов В. Д. Комета Шумейкеров–Леви 9: возможен еще один сюрприз (варианты истории орбиты с критериями проверки). *Астрономический вестник*, 1997, **31**, 6, 526–532.
- [7] Marzari F., Farinella P., Vanzani V. Are Trojan collisional families a source for short-period comets? *Astr. and Astroph.*, 1995, **299**, 267–276.
- [8] Kary D. M., Dones L. Capture statistics of short-period comets: Implications for comet Shoemaker–Levy 9. *Icarus*, 1996, **121**, 2, 207–224.
- [9] Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию.–М.: "Наука 1968, 800 стр.
- [10] Standish E. M. The Observational Basis for JPL's DE200, the Planetary Ephemerides of the Astronomical Almanac. *Astron. Astroph.*, **233**, 1990, 252–271.
- [11] Красинский Г. А., Васильев М. В. Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии. *Труды ИПА РАН*, 1997, вып. 1, 228–248.
- [12] Медведев Ю. Д. Эффекты сублимации в орбитальном и вращательном движении кометного ядра. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Л.-д. 1986.
- [13] Брумберг В. А. Релятивистская небесная механика.–М.: "Наука 1972, 382 стр.
- [14] Дельзем А. Н. Chemical composition of cometary nuclei.–In: *Comets* (ed. by Wilkening L.L), 1982, 85–130.
- [15] Замарашкина М. Д. Размеры и период вращения родительского ядра кометы Шумейкеров–Леви 9 из наблюдений его отдельных фрагментов. *Собесобщения ИПА РАН*, 2003, **152**, 28 стр.
- [16] Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений.–М.: Мир, 1980, 279 стр.
- [17] Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы обработки наблюдений.– М.: Физ.мат.гиз., 1958, 333 стр.
- [18] Everhart E. An efficient integrator of very high order and accuracy with appendix listing of RADAU.–Denver: Univ. of Denver, 1974, 20 p.

- [19] Справочное руководство по небесной механике и астродинамике (под.ред.Дубошина).–М.: "Наука 1976, 864 стр.
- [20] Levison H. F., Duncan M. J. The long-term dynamical behavior of short-period comets. *Icarus*, 1994, **108**, 18–36.
- [21] <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/JupiterTrojans.html>
- [22] Opik E. G. Comments on Lunar origin. *Irish. Astron. J.*, 1972, **10**, 190.
- [23] Carisi A., Valsecchi G. B., Greenberg R. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1990, **49**, 111–131.
- [24] Battlo V. Study of a particular Model of Encounter Between a Comet and a Planet. *Cel.Mech. and Dyn.Astron.*, 1998/1999, **71**, 3, 191–201.
- [25] Marsden B., Sekanina Z., Yeomans D. Comet and nongravitational forces. V., *Astron. J.*, 1973, **78**, 2, 211–225.

М. Д. Замарашкина

Эволюция орбиты кометы ШЛ9 до момента открытия.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**

---

Подписано к печати 28.04.2003	Формат $60 \times 90/16$ .	Офсетная печать.	Печ.л. 1.8
Уч.-изд.л. 1.8	Тираж 100	Заказ 216	бесплатно

---

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН  
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.