Федеральное агентство по образованию РФ ГОУ ВПО «Вологодский государственный педагогический университет»

О. В. Калиничева, В. П. Томанов

ДИНАМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ КОМЕТ С ПЛАНЕТАМИ

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВГПУ

УДК 523.6

Авторы монографии:

- **О. В. Калиничева**, к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики, астрономии и методики обучения физике;
- В. П. Томанов, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики, астрономии и методики обучения физике.

Рецензент: Л. И. Соколов, д.ф.-м.н., профессор, ректор ВоГТУ.

К 17

Калиничева О. В., Томанов В. П. Динамическая связь комет с планетами: Монография. – Вологда: ВГПУ, издательство, 2008. – 190 с.

ISBN 978-5-87822-360-7

ББК 22.655 УДК 523.6

В монографии описываются различные гипотезы происхождения комет, особое внимание уделено гипотезе межзвездного происхождения комет. Исследуется влияние планет Солнечной системы и некоторых транснептуновых объектов на динамическую эволюцию комет. Рассматривается проблема существования гипотетических трансплутоновых планет, влияющих на движение комет.

Для студентов физико-математических факультетов педагогических вузов и специалистов по кометной астрономии.

[©] Калиничева О. В., Томанов В. П., 2008 г.

[©] ВГПУ, издательство, 2008 г.

Оглавление

Глава 1.	КОМЕТНАЯ КОСМОГОНИЯ	
§ 1.1.	Краткий исторический обзор	4
§ 1.2.	Теория захвата межзвездных комет по Лапласу	7
§ 1.3.	Статистическая проверка гипотезы Лапласа	27
§ 1.4.	Распределение перигелиев	48
§ 1.5.	Константы Тиссерана долгопериодических комет	60
§ 1.6.	Эруптивная гипотеза	72
§ 1.7.	Гипотеза Оорта.	
Глава 2.	КОМЕТЫ И ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЬ	I
§ 2.1.	Кометы и транснептуновые планеты	90
§ 2.2.	Нептун и кометы	104
§ 2.3.	О кометном семействе Урана	110
§ 2.4.	Кометы и Титан	117
§ 2.5.	Кометы галлеевского типа	124
§ 2.6.	Юпитер и происхождение короткопериодических	
	комет	134
Глава 3.	КОМЕТЫ И ГИПОТЕТИЧЕСКИЕ ПЛАНЕТЫ	
§ 3.1.	Гипотетические трансплутоновые планеты	149
§ 3.2.	Плоскость планетной орбиты	151
§ 3.3.	Радиус орбиты планеты	154
§ 3.4.	Приливная концепция происхождения комет и	
	проблема Х планеты в галактической плоскости	160
§ 3.5.	Об одном варианте предсказания гипотетических	
	планет	169
СПИСОК	ЛИТЕРАТУРЫ	174

ГЛАВА 1. КОМЕТНАЯ КОСМОГОНИЯ

§ 1.1. Краткий исторический обзор

Начала научной кометной космогонии были заложены на рубеже XVIII и XIX веков в виде двух основных направлений, которые продолжают развиваться до настоящего времени. Laplace (1796) предложил первую научную гипотезу о межзвездном происхождении комет, ввел в небесную механику понятие сферы действия планеты, создал метод определения трансформации кометной орбиты в сфере действия Юпитера. Lagrange (1812) математически обосновал новую гипотезу о происхождении комет в результате взрывов на больших планетах, особенно на Юпитере, и явился родоначальником вулканической (эруптивной) теории происхождения комет.

За два столетия научной кометной космогонии создано несколько десятков гипотез о происхождении комет (см. Томанов, 1989). Назовем лишь некоторые из них. Оогt (1950, 1951) из анализа распределения величин обратных больших полуосей кометных орбит пришел к выводу о существовании «облака» комет на расстоянии 100–150 тыс. а.е. от Солнца. Lyttleton (1948, 1953) предложил гипотезу об образовании комет из межзвездной материи, захваченной в Солнечную систему на основе механизма гравитационной фокусировки.

Гипотезу о реликтовом происхождении комет в первичном газопылевом облаке рассматривали Шмидт (1945), Cameron (1963), Hills (1973), Шульман (1983). Согласно гипотезе Kuiper (1951), кометы конденсировались в первичной лапласовской туманности на расстоянии 40–50 а.е. от Солнца.

В гипотезе Альвена (1979) кометы рождаются в метеорных потоках. Согласно Давыдову (1981), кометы возникают при приливном разрушении астероидов. Орлов (1939) развивал

гипотезу об образовании комет в результате столкновений астероидов с крупными метеоритами.

Гипотезу о генетической связи почти параболических комет с гипотетическими транснептуновыми планетами разрабатывали Радзиевский (1987), Гулиев (1992, 1999) и др.

Мультон (1908) предположил, что кометы образуются из выброшенного Солнца. вещества, вырванного ИЛИ ИЗ (1966)Константинов высказали об др. гипотезу И антивещественной природе комет, полагая, что кометы приходят других Солнцу OT звездных систем, состоящих ИЗ антивещества.

В 1977 г. при подведении итогов исследований по кометной астрономии за 26 лет Ridley (1978) выделяет четыре основных направления: модель ледяного ядра Уиппла, облако Оорта, теория происхождения комет Литтлтона и воздействие солнечного ветра на хвосты комет. В 1986 г. в обзорной статье, посвященной происхождению комет, Bailey, Stagg (1988) выделяют три периода в истории кометной космогонии: 1) до 1940 г. кометы считались малосущественным компонентом Вселенной; 2) несколько десятилетий развивались взгляды Оорта; 3) в последнее десятилетие интенсивно исследуется захват комет из межзвездного облака.

Обилие гипотез свидетельствует о явном неблагополучии в кометной космогонии. Ни одна из гипотез получила не признания. Часто широкого гипотезы оказываются невостребованными потому, что их авторы для теоретических выводов в недостаточной мере используют данные кометных каталогов. К примеру, полностью игнорирует каталожные данные Цицин (1999). Космогоническая гипотеза, претендующая на адекватное отражение механизма рождения кометных ядер, должна: содержать сравнение теоретических и элементов кометных орбит: наблюдательных объяснять основные закономерности в кометной системе и прогнозировать новые, ранее не известные закономерности (Томанов, 1992).

В работе Кузьмичева (2003) выполнен статистический анализ системы почти параболических комет (ППК, период

P > 200 лет) с использованием каталога Marsden, Williams (2003), включающего N = 1177 ППК в появлениях до конца 2001 г. Выявлены следующие закономерности в системе ППК, иметь космогоническую интерпретацию: которые должны 1) перигелии и узлы орбит почти параболических комет основном на малых гелиоцентрических расположены В расстояниях (r < 1.5 a.e.). Это означает, что орбиты ППК пронизывают Солнечную систему преимущественно через зону планет земной группы; 2) афелии долгопериодических комет расположены около пояса Койпера; 3) функция распределения ППК по эксцентриситету резко обрывается при e = 1; 4) линии апсид ППК составляют малый угол с вектором пекулярной скорости Солнца; 5) наблюдается высокая концентрация плоскостей кометных орбит около плоскости эклиптики; 6) в системе ППК есть 372 кометы с q < 0.01 а.е. Все эти кометы движутся вблизи плоскости ($i = 143^{\circ}$, $\Omega = 0^{\circ}$) и имеют практически общий перигелий ($\lambda_{\pi} = 238^{\circ}$, $\beta_{\pi} = +35^{\circ}$)

В работе Горшковой и Кузьмичева (2006) выполнен статистический анализ комплекса короткопериодических комет (КПК, период P < 200 лет) и сделано заключение, что основными закономерностями в комплексе КПК, которым должна соответствовать космогоническая гипотеза, являются следующие: 1) преобладание прямых движений. Наклон к эклиптике $i < 30^{\circ}$ имеют 87% орбит КПК. Восемь комет ретроградные; 2) афелии (перигелии) расположены в основном вблизи узлов. Угол между линией узлов и линией апсид у 3/4 орбит составляет менее 45°; 3) в комплексе КПК выделяется большая комет (N = 172 объекта), группа которая распределении по суточному движению ограничена с одной стороны люком при n = 300", a = 5.1 a.e., соизмеримость с Юпитером 1:1; и с другой стороны люком при n = 700", a = 2.9 а.е., соизмеримость с Юпитером 7:3. Узлы и афелии комет этого семейства лежат около орбиты Юпитера. Среднее значение постоянной Тиссерана для комет данного семейства C = 2.80; 4) кометы с 10 a.e. < a < 50 a.e. двигаются в резонансе с Сатурном и Нептуном, соизмеримость 1:1. Динамические

характеристики комет этой группы близки к соответствующим параметрам почти параболических комет. Названные закономерности могут использоваться как критерии для тестирования космогонических гипотез.

§ 1.2. Теория захвата межзвездных комет по Лапласу

Впервые предположение о приходе комет к Солнцу из межзвездного пространства выдвинул Laplace (1796, 1806). Развивая идею Лапласа о межзвездном происхождении комет во второй половине XIX века Newton (1878, 1891), Tisserand (1896), Schulhof (1891), Callandrean (1892) заложили основы теории происхождения короткопериодических комет в результате захвата — преобразования первоначальной вытянутой орбиты в короткопериодическую под действием сильных планетных возмущений при прохождении кометы в сфере действия планеты.

Гипотеза Лапласа о межзвездном происхождении комет была предложена В те времена, когда из-за недостаточной статистического материала И изученности эффектов селекции при открытии комет подтверждение выводов наблюдательными данными не представлялось возможным. На протяжении последующего столетия удалось достоверностью практического c лишь факт отсутствия гиперболических орбит и крайне малую вероятность захвата кометы на эллиптическую орбиту по сравнению с вероятностью прохождения гиперболической кометы.

Большинством космогонистов указанные два обстоятельства были возведены в ранг experimentum crucis, говорящего против гипотезы Лапласа. Кроме того, указывалось на малую вероятность конденсации твердых тел в условиях межзвездного пространства.

Между тем гипотеза Лапласа является чрезвычайно привлекательной по меньшей мере по следующим соображениям: а) кометные ядра, образовавшиеся в недрах галактической туманности, могут быть наделены «от рождения» всем комплексом физико-химических свойств, интерпретация которых в рамках гипотез их происхождения внутри Солнечной

системы была бы затруднительной; б) движение Солнца к апексу должно нарушать центрально-симметричное распределение элементов кометных орбит в Солнечной системе.

Соответствующая асимметрия элементов может быть предсказана из небесно-механических соображений и после тщательного учета эффектов селекции и пертурбаций подтверждена наблюдательными данными.

Что же касается первых двух трудностей, о которых упоминалось выше, то они полностью снимаются, отказаться от предположения о перманентной встрече Солнца с кометными ядрами. Необходимо допустить, что τ лет назад Солнце прошло через астероидальное облако и захватило нужное число комет. Это время au должно быть достаточно большим, чтобы никто из наших предков не мог нам поведать об огромном числе гиперболических комет, сиявших тогда на небе. Оно должно быть достаточно большим, чтобы астроблемы на Земле успели подвергнуться эрозии, чтобы «выгорели» почти все короткопериодические кометы, доля которых, как будет показано ниже, при любых начальных условиях должна быть в среднем 70-80 %, а не 30-40 %, как это имеет место в действительности. Время т должно быть достаточно большим, чтобы все быстровозмущаемые элементы орбит успели потерять следы своего происхождения, если предсказываемая для них асимметрия не подтвердится статистическим материалом. В то же время величина au должна быть достаточно маленькой, чтобы медленно возмущаемые элементы у долгопериодических комет сохранили те известные нам и вновь предсказанные корреляции, которые невозможно объяснить эффектами селекции и без гипотеза Лапласа потеряла наличия которых бы свои преимущества.

Наконец, время au должно быть достаточно оптимальным, чтобы положение солнечного апекса не успело измениться с тех пор радикальным образом.

По поводу трудности, связанной с образованием твердых сгущений в недрах Галактики, можно сказать, что теоретически обоснована возможность конденсации кометных льдов в

межзвездных облаках. Впервые Фесенков (1961) показал, что в межзвездной среде возможна конденсация на тугоплавких элементах, например на железных пылинках, с образованием в твердой фазе Н2О, СН и др. По мнению Фесенкова, тесные скопления таких частиц и служат ядрами непериодических комет. Greenberg (1984) проследил эволюцию межзвездной пыли до агрегации в кометезимали за 5.10^9 лет и пришел к заключению: кометы – продукты межзвездной пыли. Из анализа характеристик комет межзвездном физических вывод происхождении комет делают Donn (1976), Whipple и Lecar (1976), Biermann (1978). Clube и Napier (1985) сделали оценку средней плотности комет в молекулярных облаках - 10^{-1} (a.e)⁻³.

Получены данные о тождественности химического состава комет и межзвездной среды. O'Dell (1971), Cooke и Wickramasinghe (1976) сравнили инфракрасный спектр (ИК) некоторых комет, ИК источника в Орионе с теоретическими спектрами сферических пылинок и сделали заключение о подобии свойств комет и межзвездных пылинок.

Сопоставляя наблюдательные данные о межзвездных молекулах с результатами многочисленных экспериментов по моделированию процессов в первичной атмосфере Земли, Добровольский, Каймаков и Матвеев (1977) сделали вывод о генетической тождественности межзвездной среды и родительских молекул комет.

Фоменкова и др. (1989) с помощью масс-спектрометров, установленных на KA «Вега», исследовали свойства и химический состав компонент пылевых частиц кометы Галлея. В частности, показано, что все изотопные соотношения, в том числе 12 С/ 13 С, согласуются со средним космическим содержанием изотопов. По заключению авторов, полученные результаты свидетельствуют о сходстве межзвездной и кометной пыли

Комета С/1992 В2 Хиакутаке принесла новый весомый аргумент в пользу гипотезы межзвездного происхождения комет: в коме кометы было впервые обнаружено свечение молекул изоциановой кислоты (HNC), которое ранее

наблюдалось только в межзвездных облаках. По мнению Чурюмова (1996), данная комета не была «вырвана» из облака Оорта, а была захвачена в Солнечную систему.

Hoyle и Lyttleton (1939) отмечали, что прохождение Солнечной системы через плотные пылевые облака сопровождалось захватом материи и резким изменением климата. МсСrea (1975) показал, что, двигаясь в космосе, Солнце могло несколько раз пересекать пылевые полосы с интервалом около 100 миллионов лет. В колонке лунного грунта, взятой экипажем «Аполлон-15», Lindsay и Srnka (1975) обнаружили три космической пыли, интервалы между выпадениями которых соответствуют циклам МсСгеа. Согласно Голенецкому и др. (1980), общий приток кометного вещества на поверхность земного шара за 4 млрд лет оценивается величиной до 5 % современной массы земной коры.

Из анализа периодичности кратерообразования на поверхности Земли сделан вывод (Davis, Hutt, 1984), кометная бомбардировка Земли, вызванная прохождением Солнечной системы через межзвездные облака, проходила с периодом около 26 млн лет. Hatt и др. (1987) считают, что кометные потоки и связанное с ними кратерообразование на Земле в прошлом имели место 0.5-1 млн. лет назад, а также 35, 65 и 99 млн лет назад. Таким образом, на основе данных по литературным источникам можно считать, что последнее погружение Солнечной системы в межзвездное облако имело место 1-2 млн лет тому назад. Учитывая, что возраст долгопериодических комет по фотометрическим оценкам также составляет 1-2 млн лет, можно предположить, что акт захвата состоялся в эпоху последнего прохождения Солнца через межзвездное облако. Заметим, что только в эпоху захвата могли наблюдаться выраженными бы кометы c резко гиперболическими эксцентриситетами орбит. Часто встречающийся в литературе упрек адрес межзвездного происхождения комет об отсутствии сегодня гиперболических комет несостоятелен.

сущность захвата по схеме Лапласа. Напомним пересечения границы сферы влияния планеты ядро движется по невозмущенной гелиоцентрической орбите. Все символы, относящиеся к этой начальной орбите, мы будем снабжать индексом «0». Одна из веток начальной гиперболы проходит через радиант ядра, который совпадает с апексом Солнца, если само ядро покоится в бесконечности относительно того центроида звезд, ПО отношению К которому определены элементы солнечного апекса. Скорость ядра в бесконечности v_{∞} относительно покоящегося Солнца в этом случае должна удовлетворять условию $\bar{v}_{\infty} = -\bar{v}_{\Theta}$, где \bar{v}_{Θ} – вектор скорости движения Солнца к апексу.

После проникновения ядра в сферу влияния планеты оно движется по невозмущенной планетоцентрической орбите. Относящиеся к этой орбите символы мы будем снабжать индексом «1», а при необходимости индексами «1.1» и «1.2» в момент входа и выхода ядра из сферы действия планеты соответственно, если обозначаемые параметры являются переменными.

После выхода из сферы влияния ядро снова движется по невозмущенной гелиоцентрической орбите, которая и является конечной орбитой захваченной кометы (соответствующие символы без индексов).

Движение планеты будем считать круговым, происходящим со скоростью

$$u = \sqrt{\mu/R} , \qquad (1.1)$$

где μ – гравитационный параметр Солнца, а R – радиус орбиты планеты. Тогда начальная (v_0) и конечная (v) скорости ядра в районе орбиты планеты будут определяться из равенств

$$v_0^2 = 2u^2 + v_\infty^2$$
; $v^2 = 2u^2 - \frac{\mu}{a} \le 2u^2$, (1.2)

где a — большая полуось конечной орбиты захваченного ядра. Конкретная величина радиуса сферы действия или влияния планеты r_0 для последующих упрощений и расчетов не играет роли. Важно только, чтобы величина r_0 была достаточно мала

 $(r_0 << R)$, чтобы выполнялись равенства (1.2), и достаточно велика, чтобы можно было считать, что

$$v_1^2 >> 2\mu_1/r_0; \ \rho^2 << r_0^2,$$
 (1.3)

где μ_1 — гравитационный параметр планеты.

В дальнейшем мы будем пользоваться несколькими системами координат. Прежде всего введем две декартовы системы: абсолютную $x_0y_0z_0$ и переносную x_1,y_1,z_1 . У переносной системы начало совпадает с планетой, плоскость x_1oy_1 — с плоскостью ее орбиты, а ось oy_1 — с вектором скорости планеты u.

Начало абсолютной (неподвижной) системы координат совпадает с Солнцем, плоскость x_0oy_0 — с плоскостью x_1oy_1 , а ось oy_0 , — с вектором скорости планеты u в эпоху прохождения ядра через сферу действия планеты. Из последнего определения следует, что мы пренебрегаем поворотом вектора u за время движения ядра по переходной орбите, что будет обосновано ниже.

Геометрический смысл захвата состоит в следующем. Ядро кометы приближается к планете по начальной орбите с гелиоцентрической скоростью, вектор которой v_0 составляет с вектором u угол β_0 . Относительная планетоцентрическая скорость ядра в момент входа в сферу влияния, очевидно, будет

$$\bar{v}_{1,1} = \bar{v}_0 - \bar{u}. \tag{1.4}$$

При движении ядра по переходной орбите вектор v_1 монотонно меняется по направлению, а по величине сначала растет, а затем уменьшается до величины $v_{1,2} = v_{1,1}$ в момент выхода ядра из сферы действия планеты. В этот момент абсолютная гелиоцентрическая скорость ядра будет

$$\overline{v} = \overline{u} + \overline{v}_{1,2},$$
 (1.5)

причем величина v обязана удовлетворять условию (1.2), а вектор \bar{v} будет составлять угол β с вектором \bar{u} .

Докажем следующую основную теорему захвата. Необходимым и достаточным условием захвата малого тела Солнечной системой является такое взаимодействие его с планетой, в результате которого проекция скорости этого тела на вектор скорости планеты уменьшается на величину $v_{_{\infty}}^{^{2}}/2u$.

В самом деле, из (1.4) и (1.3) имеем

$$v_{1,1}^2 = v_0^2 + u^2 - 2v_0u\cos\beta_0$$
, $v_{1,2}^2 = v^2 + u^2 - 2vu\cos\beta$.

Приравнивая правые части этих равенств и используя (1.2), получаем

$$v_0 \cos \beta_0 - v \cos \beta = \dot{y}_0 - \dot{y} = v_\infty^2 / 2u + \mu / 2au,$$
 (1.6)

что при $a \to \infty$ и дает сформулированное выше условие захвата.

Заметим, что при доказательстве этой теоремы мы не использовали допущение об отсутствии поворота вектора \overline{u} .

В момент входа и выхода ядра из сферы действия планеты проекции его скорости на оси ox и oz остаются неизменными, а проекция скорости на ось oy меняется дискретно на величину u.

Таким образом, мы имеем

$$\dot{x}_{1,1} = \dot{x}_0; \ \dot{y}_{1,1} = \dot{y}_0 - u; \ \dot{z}_{1,1} = \dot{z}_0,
\dot{x}_{1,2} = \dot{x}_0; \ \dot{y}_{1,2} = \dot{y}_0 - u; \ \dot{z}_{1,2} = \dot{z}_0,$$
(1.7)

Из (1.7), (1.6) и (1.1) следует

$$\dot{y}_{1,1} - \dot{y}_{1,2} = \dot{y}_0 - \dot{y} = \frac{R}{2a}u + \frac{v_{\infty}^2}{2u}$$
 (1.8)

Таким образом, все необходимое, согласно теореме, уменьшение проекции скорости ядра на ось *оу* должно произойти внутри сферы действия планеты.

возможностей Перейдем теперь оценке К осуществить необходимый для захвата поворот вектора скорости \bar{v}_1 . Используя полученные ниже результаты, нетрудно было бы показать, что угол этого поворота имеет порядок 10°. Между тем поворот вектора \overline{v}_1 происходит интенсивный небольшом отрезке планетоцентрической орбиты в районе ее перицентра. За время движения ядра по этому отрезку орбиты вектор \bar{u} у Юпитера, например, успевает повернуться лишь на малые доли градуса. Таким образом, введенное нами упрощение $(\overline{u} = \text{const})$ не может существенно повлиять на полученные ниже результаты.

Пренебрегая размерами сферы влияния планеты, мы можем считать, что все ядра, имеющие общий радиант, подходят к планете параллельным потоком. После вычитания вектора u из вектора скорости каждого ядра образуется поток коллинеарных векторов $v_{1,1}$.

Нетрудно видеть, что существует плоскость, компланарная и потоком векторов $\overline{v}_{1,1}$. В самом деле, параллельным переносом совместим начало любого из векторов $\overline{v}_{1,1}$ с началом вектора \overline{u} и проведем через них плоскость P. Все остальные вектора $\bar{v}_{1,1}$ будут ей параллельны, а некоторое плоское множество векторов $\bar{v}_{1,1}$ будет совпадать с P и переходные орбиты, лежащие в плоскости P. порождать Займемся сначала исследованием переходных орбит, лежащих в плоскости Р. Все они будут отличаться друг от друга величиной прицельного расстояния ρ , через которое планетоцентрический количества движения ядра выражается простым момент соотношением

$$K_1 = \rho v_1. \tag{1.9}$$

Образуем в плоскости P общую для всех этих орбит декартову систему координат $\xi' o \eta'$ с началом в планете и осью $o \xi'$, параллельной вектору $\overline{v}_{1,1}$ (см. рис. 1.1). Кроме того, для каждой орбиты образуем в той же плоскости и с тем же началом систему $\xi o \eta$ с осью $o \xi$, проходящей через перицентр данной орбиты.

Первые интегралы движения по переходной орбите запишем в обеих системах в форме, полученной в (Радзиевский, 1972):

$$K_1 \xi = -\mu_1 \frac{\eta}{r}; K_1 \eta = -\mu_1 \frac{\xi}{r} + \mu_1 e_1;$$
 (1.10)

$$K_1 \dot{\xi}' = -\mu_1 \frac{\eta'}{r} - \mu_1 e_1 \sin \omega_1; \ K_1 \eta' = -\mu_1 \frac{\xi'}{r} + \mu_1 e_1 \cos \omega_1. (1.11)$$

Здесь r — планетоцентрическое расстояние ядра, e_1 — эксцентриситет его переходной орбиты, независимой от выбора системы отсчета, ω_1 — угол между осью $o\xi'$, параллельной $v_{1,1}$, и осью $o\xi$.

Из системы (1.10) и рис. 1.1 нетрудно видеть, что при входе и выходе ядра из сферы действия планеты мы будем иметь

$$\xi_1 = \xi_2$$
; $\eta_1 = -\eta_2$; $\dot{\xi}_1 = \dot{\xi}_2 = v_{1,1} \cos \omega_1$; $\dot{\eta}_1 = -\dot{\eta}_2$.

Таким образом,

$$\Delta \xi = \xi_1 - \xi_2 = 2v_{11} \cos \omega_1; \ \Delta \eta = 0,$$
 (1.12)

откуда следует, что за время движения ядра по переходной орбите в конечном счете изменяется только проекция скорости ядра на ось $o\xi$. Следовательно, изменение проекции скорости v_1 на любую другую ось будет равно произведению $\Delta \xi$ на косинус угла ψ между осью $o\xi$ и интересующей нас осью.

В частности, как видно из рис. 1.1, угол между осью $o\xi$ и вектором u будет $\psi = 360^{\circ} - \omega_{\scriptscriptstyle 1} - \beta_{\scriptscriptstyle 1,1}$. Поэтому уменьшение проекции скорости $v_{\scriptscriptstyle 1}$, на вектор u составит

$$\Delta \xi \cos \psi = 2v_{1,1} \cos \omega_1 \cos \left(\psi_1 + \beta_{1,1} \right). \tag{1.13}$$

Таким образом, условие захвата (1.6) принимает вид

$$2v_{1,1} \left(\cos^2 \omega_1 \cos \beta_{1,1} - \cos \omega_1 \sin \omega_1 \sin \beta_{1,1} \right) = \sigma, \quad (1.14)$$

где

$$\sigma = \frac{v_{\infty}^2}{2u} + \frac{R}{2a}u \,. \tag{1.15}$$

В системе $\xi' o \eta'$ мы имеем

$$\xi_1' = v_{1,1}; \; \eta_1' = 0; \; \xi_1' = -\sqrt{r_0^2 - \rho^2}; \; \eta_1' = -\rho.$$

Подставляя эти значения в (1.11), а также используя (1.3) и (1.9), получаем

$$\rho = -\mu_1 e_1 \sin \omega_1 / v_{11}^2$$
; $e_1 \cos \omega_1 = 1$,

откуда

$$\sin \omega_{1} = -\rho / \sqrt{\mu_{1}^{2} / v_{1,1}^{4} + \rho^{2}};$$

$$\sin \omega_{1} = -\mu_{1} / v_{1,1}^{2} / \sqrt{\mu_{1}^{2} / v_{1,1}^{4} + \rho^{2}}.$$
 (1.16)

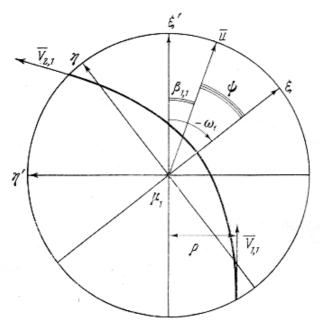


Рис. 1.1. Переходная планетоцентрическая орбита и компоненты скорости

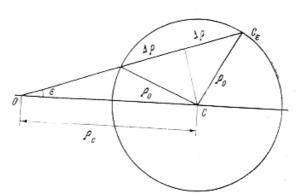


Рис. 1.2. Геометрический смысл корней уравнения (1.19)

Подставляя (1.16) в (1.14) и решая полученное равенство относительно ρ , находим

$$\rho = \frac{\mu_1}{v_{1,1}\sigma} \sin \beta_{1,1} \pm \frac{\mu_1}{v_{1,1}\sigma} \sqrt{\sin^2 \beta_{1,1} + \frac{2\sigma \cos \beta_{1,1}}{v_{1,1}} - \frac{\sigma^2}{v_{1,1}^2}}.(1.17)$$

Из треугольника, образованного векторами \overline{u} , $\overline{v}_{1,1}$ и \overline{v}_0 , имеем $v_{1,1}\sin\beta_{1,1}=v_0\sin\beta_0$; $v_{1,1}\cos\beta_{1,1}=v_0\cos\beta_0-u$. С помощью этих равенств выражению (1.17) можно придать вид

$$\rho = \frac{\mu_1 v_0}{v_{1,1}^2 \sigma} \sin \beta_0 \pm \frac{\mu_1 v_0}{v_{1,1}^2 \sigma} \sqrt{\sin^2 \beta_0 + \frac{2\sigma \P_0 \cos \beta_0 - u}{v_0^2} - \frac{\sigma^2}{v_0^2}}. \quad (1.18)$$

Формула (1.18) определяет величину прицельного расстояния, при котором вектор скорости $\overline{v_1}$ ядра, движущегося в плоскости P, поворачивается на нужный угол, обеспечивающий захват на конечную орбиту с большой полуосью, определяемой через σ из равенства (1.15).

Как уже говорилось выше, плоскость P образована векторами \overline{u} и $\overline{v}_{1,1}$, причем начало последнего совмещено с планетой. Возьмем теперь произвольную плоскость P_{ε} , проходящую через этот вектор $\overline{v}_{1,1}$. Пусть она образует угол ε с главной плоскостью P. При любом значении ε плоскость P_{ε} будет проходить через некоторое равновеликое рассмотренному выше множество векторов $\overline{v}_{1,1}$, порождающих переходные орбиты в плоскости P_{ε} .

В плоскости P_{ε} построим точно таким же образом системы $\xi' \circ \eta'$ и $\xi \circ \eta$. Так же как и выше, получим, что изменение проекции скорости на ось $o\xi$ составит $-2v_{_{1,1}}\cos\omega_{_{1}}$. Однако угол ψ между осью $o\xi$ и вектором u, не лежащим в плоскости P_{ε} теперь уже будет другим. Он легко находится из сферического треугольника, образуемого векторами u, $v_{_{1,1}}$ и перицентром орбиты в плоскости P_{ε}

$$\cos\psi = \cos\omega_1 \cos\beta_{11} - \sin\omega_1 \sin\beta_{11} \cos\varepsilon.$$

Подставляя это выражение в условие захвата

$$\Delta \xi \cos \psi = 0$$

и повторяя все изложенные выше действия, находим

$$\rho = \frac{\mu_{1}v_{0}\sin\beta_{0}}{v_{1,1}^{2}\sigma}\cos\varepsilon \pm \frac{\mu_{1}v_{0}}{v_{1,1}^{2}\sigma}\sqrt{\sin^{2}\beta_{0}\cos\varepsilon + \frac{2\sigma\P_{0}\cos\beta_{0} - u - \sigma^{2}}{v_{0}^{2}}}$$
(1.19)

Нетрудно видеть, что совокупность корней (1.19) при фиксированных значениях β_0 , v_0 , $v_{1,1}$, σ , но различных углах ε образует в плоскости Q, перпендикулярной потоку векторов $v_{1,1}$, круг, который мы будем называть «прицельным яблоком». Радиус этого круга составляет

расстояние его центра от центра планеты

$$\rho_C = \frac{\mu_1 v_0}{v_{1,1}^2 \sigma} \sin \beta_0. \tag{1.21}$$

В самом деле, на рис. 1.2, изображенном в плоскости Q, O- планета, C- центр круга (1.20), прямые OC и OC_{ε} - линии пересечения плоскости Q с плоскостями P и P_{ε} . Как видно из рисунка, геометрический смысл корней (1.19) может быть представлен следующим образом:

$$\rho = \rho_C \cos \varepsilon \pm \Delta \rho \,,$$

где

$$\Delta \rho = \sqrt{\rho_0^2 - \rho_C \sin^2 \varepsilon} .$$

Подставляя сюда (1.20) и (1.21), мы получим (1.19).

Анализ формул (1.19)-(1.21) позволяет сделать следующие заключения.

- 1. При минимальном значении $\sigma = v_{\infty}^2/2u$, соответствующем захвату параболических комет, радиус прицельного яблока и расстояние до его центра максимальны. С уменьшением a увеличивается σ и уменьшается ρ_0 . Следовательно, любое ядро, прошедшее через прицельное яблоко, захватывается на эллиптическую орбиту.
- 2. При $\beta_0 = 0$ центр прицельного яблока совпадает с центром планеты. С ростом β_0 центр яблока смещается в плоскости P в направлении возрастания положительных значений K_1 , т.е. от Солнца. При $\beta_0 = 90^\circ$ величина ρ_C достигает максимума.

Таблица 1.1. Относительное положение и размеры прицельных яблок для Юпитера при $\beta_0 = 90^\circ$

Пара-	$v_{\infty} = 0.5u$	$v_{\infty} = u$	Пара-	$v_{\infty} = 0.5u$	$v_{\infty} = u$
метры			метры		
$\sigma_{\scriptscriptstyle p}$	0.125u	0.5 <i>u</i>	$ ho_{\scriptscriptstyle cp}$	2.74·10 ¹¹ см	6.38·10 ¹⁰ см
$\sigma_{_e}$	0.166 <i>u</i>	0.541 <i>u</i>	$ ho_{0p}$	2.56·10 ¹¹ см	4.87 10 ¹⁰ см
v_0^2	$2.25u^2$	$3u^2$	$ ho_{\scriptscriptstyle ce}$	2.07·10 ¹¹ см	5.89 10 ¹⁰ см
$v_{1,1}^{2}$	$3.25u^{2}$	$4u^2$	$ ho_{0e}$	1.90·10 ¹¹ см	4.34 10 ¹⁰ см

- 3. Поскольку угол β_0 заключен в пределах $\beta_A < \beta_0 < 180^\circ \beta_A$, где β_A эклиптическая широта апекса, то $\rho_C > \rho_0$. Следовательно, центр планеты находится вне границ прицельного яблока.
- 4. В грубом приближении площадь прицельного яблока $\pi \rho_0^2$ обратно пропорциональна σ^2 или v_∞^4 . Следовательно, и вероятность захвата w обратно пропорциональна четвертой степени v_∞ . Фактически величина w зависит от v_∞ в еще более высокой степени.

В дальнейшем мы будем исследовать захват комет только Юпитером ($u=13.1~\kappa m/ce\kappa$). По причинам, излагаемым ниже, испытанию будут подвергнуты два варианта начальных скоростей $v_{\infty}=0.5u$ и $v_{\infty}=u$.

Значения величины σ , вычисленные по формуле (1.15) для этих начальных скоростей и для захвата на параболическую (σ_p) и эллиптическую с периодом T=500 лет (σ_e) орбиты, а также значения всех скоростей при $\beta_0=90^\circ$, расстояний до центров яблок и радиусов последних приводятся в табл. 1.1.

На рис. 1.3 изображены размеры и относительные положения прицельных яблок и границ захвата долгопериодических комет для оптимального значения $\beta_0 = 90^\circ$. Сам Юпитер изображен на рис. 1.3 черным кружком. Заштрихованное кольцо образует «мертвую зону». Проходящее

через него ядро падает на планету. Радиус этой зоны соответствует эффективному радиусу Юпитера и вычисляется по формуле

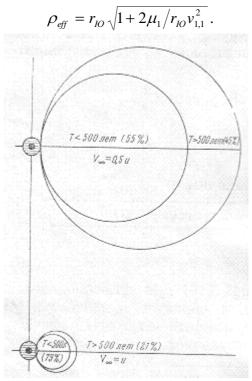


Рис. 1.3. Сравнительные размеры прицельных яблок и относительное положение их центров при разных $\, \mathcal{V}_{\scriptscriptstyle \infty} \,$

Как видно из рис. 1.3, мертвая зона лишь незначительно ущербляет прицельное яблоко. При других возможных углах β_0 ущерб несколько возрастает, но практически ущербляется во всех случаях только яблоко короткопериодических комет. Мы же будем проводить сравнение результатов только с данными для долгопериодических комет. Поэтому в дальнейшем влияние мертвой зоны учитывать не станем.

Реальное значение угла β_0 зависит от начальных условий движения ядра и от места его встречи с планетой.

Если бы астероидальное облако, с которым встретилось Солнце, не имело пекулярного движения, а дисперсия скоростей ядер относительно центра облака отсутствовала, то у всех ядер были бы общие начальные условия: координаты радианта совпадали бы с координатами апекса Солнца, а начальные скорости всех ядер были бы одинаковыми ($v_{\infty} = v_{\Theta} = 1.5u$).

Если же принять, что тангенциальная скорость пекулярного движения облака составляла 7 км/сек (Аллен, 1966), то радиант мог быть смещен от апекса примерно на 20° в неизвестном направлении. Дисперсия скоростей ядер могла вызывать эффект «размазывания» радианта по небольшому сегменту небесной сферы с центром в радианте покоящихся ядер. За отсутствием более точных данных мы примем, что радиант облака совпадал с современным апексом Солнца

$$\lambda_A = 270^{\circ}; \ \beta_A = \arccos 0.6.$$
 (1.22)

Можно ожидать, что сравнение результатов со статистическим материалом позволит нам уточнить положение радианта облака в пределах $\pm 20^{\circ}$ по отношению к апексу (1.22).

более важное Неизмеримо значение ДЛЯ вероятности захвата имеет величина v_{∞} . Если даже средняя скорость облака составляла 1.5и, то вследствие дисперсии скоростей существовала некоторая доля ядер, меньшие скорости. Допустим, что вероятность иметь отклонение от среднего значения описывается нормальным распределением Гаусса. Нетрудно было бы показать, что, хотя в этом случае число ядер, имеющих скорость $v_{\infty} < 1.5 u$, будет меньше числа ядер со скоростью $v_{\infty} = 1.5u$, захват первых может быть более вероятным, вторых, поскольку вероятность чем пропорциональна площади прицельного яблока, а последняя обратно пропорциональна v_{x}^{4} . В частности, при дисперсии скоростей ядер порядка 5 км/сек, вероятность захвата при $v_{m} = 0.5u$ и $v_{m} = u$ значительно превосходит вероятность захвата ядер с $v_{\infty} = 1.5$, несмотря на меньшую пространственную плотность первых.

Использованный нами метод дискретных испытаний показал, что наилучшее согласие со статистическими данными возникает при эффективном значении $v_{_{\infty}}$, в пределах $0.5u < v_{_{\infty}} < u$.

Займемся теперь определением угла β_0 в зависимости от эклиптической долготы места захвата, которую будем отсчитывать от долготы апекса Солнца (наклоном орбиты Юпитера пренебрегаем).

Уравнение начальной орбиты ядра имеет вид

$$R_0 = \left(\left(\frac{2}{0} \right) / \mu \right) + e_0 \cos \left(\theta - \theta_{\pi} \right). \tag{1.23}$$

Угол \mathcal{G} отсчитывается здесь от радианта ядра, угол \mathcal{G}_{π} определяет положение перигелия начальной орбиты. Подставляя в (1.23) $\mathcal{G}=0$, $R_{\scriptscriptstyle 0}=\infty$, получаем $e_{\scriptscriptstyle 0}\cos\mathcal{G}_{\pi}=-1$ и, следовательно,

$$K_0^2 = \mu R_0 \left(-\cos\theta + \sqrt{e_0^2 - 1}\sin\theta \right).$$
 (1.24)

Учитывая, что $e_0^2 = 1 + v_\infty^2 K_0^2 / \mu^2$ и $K_0 = R_0 v_{0p}$, где v_{0p} — трансверсальная скорость, находим из (1.24)

$$v_{0p} = \frac{v_{\infty} \sin \theta}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{4u^2}{v_{\infty}^2 \left(+ \cos \theta \right)}} \right]. \tag{1.25}$$

Угол β_0 будем определять только для прямых начальных орбит (K>0, $i_0<90^\circ$). Всякая обратная орбита, рассматриваемая со стороны южного полюса эклиптики и проходящая через узел с долготой $360^\circ-\lambda_c$, будет полностью совпадать с прямой орбитой, проходящей через узел с долготой λ_c . Однако движение Юпитера будет в этом случае обратным. Таким образом, если у прямой орбиты, проходящей через узел с долготой λ_c , вектор $\bar{\nu}_0$ составляет с вектором \bar{u} угол β_0 , то у обратной орбиты, проходящей через одноименный узел с долготой $360^\circ-\lambda_c$, этот угол будет $180^\circ-\beta_0$. Таким образом, величину угла β_0 для обратных начальных орбит легко будет найти из соображений симметрии.

Поскольку мы будем искать решение только для случая $K_0 > 0$, в формуле (1.25) следует брать знак минус при $\vartheta > 180^\circ$.

В сферическом треугольнике ABC (рис. 1.4) — A — апекс Солнца, он же радиант потока ядер, B — проекция апекса на эклиптику ($\lambda = 0$, $\beta = 0$), C — место захвата (λ_C), i_0 — наклон начальной орбиты $AB = \beta_A$, $AC = \mathcal{G}$. Из этого треугольника следует:

$$\sin \theta = \pm \frac{\sin \beta_A}{\sin i} \,. \tag{1.26}$$

3десь «+» в 🕅 и «−» в Ю;

$$\cos \theta = \cos \beta_A \cos \lambda_C \,, \tag{1.27}$$

$$tg i_0 = tg \beta_A / \sin \lambda_C. \qquad (1.28)$$

Подставляя (1.26) и (1.27) в (1.25), используя соотношение

$$\dot{y}_0 = v_0 \cos \beta_0 = v_{0p} \cos i_0 \tag{1.29}$$

и решая результат подстановки совместно с (1.28), получаем

$$\cos \beta_0 = \frac{v_\infty \cos \beta_A \sin \lambda_C}{2v_0} \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{4u^2}{1 + \cos \beta_A \cos \lambda_C}} \right]. (1.30)$$

Для прямых начальных орбит $\cos \beta_0 > 0$, поэтому верхний знак в (1.30) берется при $\lambda_C > 180^\circ$.

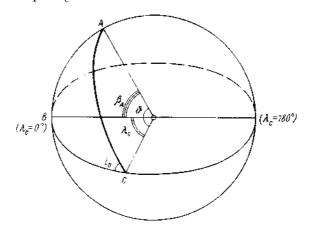


Рис. 1.4. Начальная орбита и связь между i_0 и местом захвата

Зная $\cos\beta_0$, легко находим по (1.29) \dot{y}_0 , а затем и составляющую на ось oz момента количества движения конечной орбиты

$$K_z = R\dot{y} = \mathbf{v}_0 - \sigma \mathbf{R}. \tag{1.31}$$

Займемся теперь определением среднего значения элементов конечных орбит в функции места захвата λ_c . Очевидно, средние значения элементов соответствуют захвату ядер, проходящих через среднее значение прицельного яблока, т.е. в плоскости P, содержащей вектор u Φy_1 . Плоскость переходной орбиты, проходящая через ось oy_1 , пересекает плоскость x_1oz_1 по прямой, совпадающей с проекцией вектора v_1 на эту плоскость. Угол наклона этой прямой к плоскости эклиптики равен углу i_1 наклона переходной орбиты к этой же плоскости. За время движения ядра по переходной орбите угол i_1 не меняется:

$$tg i_1 = z_1/x_1 = const.$$

Подставляя сюда значения составляющих скоростей в начале и в конце движения по переходной орбите и используя (1.7), будем иметь

$$\dot{z}_0 / \dot{x}_0 = \dot{z} / \dot{x}. \tag{1.32}$$

Из (1.32), в частности, следует, что характер узла (\emptyset или \emptyset) конечной средней орбиты совпадает с таковым у начальной орбиты ядра кометы.

Уравнение (1.32) содержит лишь два неизвестных: \dot{x} и \dot{z} . Другим уравнением, содержащим эти же неизвестные, для почти параболической орбиты будет

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 = 2u^2, \qquad (1.33)$$

где

$$\dot{\mathbf{y}} = \dot{\mathbf{y}}_0 - \boldsymbol{\sigma}_p.$$

Таким образом, совместное решение (1.32) и (1.33) завершает определение составляющих скорости ν в узле конечной орбиты.

Теперь уже легко находятся все остальные элементы конечной орбиты, а именно:

полный момент количества движения

$$K = R\sqrt{\dot{y}^2 + z^2} ,$$

перигелийное расстояние

$$q=K^2/2\mu\,,$$

угол наклона

$$i = \operatorname{arctg} \frac{\dot{z}}{\dot{y}},$$

аргумент перигелия из формулы для радиальной скорости $\sin \omega = -K \dot{x} / \mu$.

Наконец, из сферического треугольника с вершинами в Ω , π и проекции перигелия на эклиптику при помощи предыдущих соотношений легко находим широту и долготу перигелия

$$\sin \beta_{\pi} = \dot{x}\dot{z}/u^2$$
; $\cos \mathbf{Q}_{\pi} - \Omega = \cos \omega / \cos \beta_{\pi}$.

В заключение рассмотрим вопрос о вероятности захвата Юпитером комет с периодом P > 500 лет. Из полученных выше формул следует, что площадь «прицельной лунки», соответствующей захвату долгопериодических комет, растет с уменьшением β_0 и является оптимальной при $\beta_0 = 90^\circ$.

Для этого угла β_0 определим среднюю пространственную плотность размазанной астероидальной материи δ , соответствующую захвату одной кометы в год с массой ядра $m=10^{15}$ г. Очевидно,

$$m = \pi \left(\sum_{p}^{2} - \rho_{e}^{2} \right) V_{1,1} t \delta.$$

Подставляя сюда соответствующие числовые данные, находим: при $v_{_\infty}=0.5u$ $\delta=1.4\cdot10^{-22}$ г/см 3 , при $v_{_\infty}=u$ $\delta=7.8\cdot10^{-20}$ г/см 3 .

Полученные плотности являются вполне реальными, а время прохождения Солнца через облако могло составлять несколько десятков тысяч лет. Таким образом, возможность захвата нужного числа комет также не вызывает сомнений.

Нам остается еще заметить, что большая скорость, с которой захватываемые ядра проникают в сферу действия планеты при $v_{\infty} \ge 0.5u$, значительно снижает погрешность,

вызываемую заменой схемой Лапласа численного определения траектории ядра в рамках трехтельной задачи. Преимущества схемы Лапласа, позволяющей описать общую картину захвата в аналитическом виде, настолько велики, что эта схема еще и в наше время успешно применяется для решения задач захвата (см., например, Bandermann, Wolstencroft, 1970).

Во второй половине XX века в связи с развитием вычислительной техники появилось огромное число публикаций, посвященных проблеме захвата комет. В работе обзор (1987)работ Valsechi лан ПО захвату короткопериодических здесь рассмотрены комет, же одноступенчатые И многоступенчатые захваты, изучены либрационные движения в окрестности резонансов с большими планетами.

Проблеме происхождения короткопериодических комет в результате захвата планетами-гигантами посвящены работы Томанова (1980а,б; 1981; 1982б; 1983г). В обстоятельных работах Казимирчак-Полонской (1978а), удостоенных премии им. Бредихина, не только подтверждены основные выводы французских теоретиков, но и сделан новый значительный шаг в развитии теории захвата. Ею исследована эволюция многих короткопериодических комет $(K\Pi K)$ c полным планетных возмущений, а иногда и с учетом негравитационных эффектов на интервале четырехсот лет (1660-2060гг.). Everhart (1972, 1976) методом Монте-Карло исследовал миллионы фиктивных комет на больших интервалах времени, подтвердил выводы Казимирчак-Полонской, большинство КПК могут быть получены в результате захвата с перигелийное расстояние парабол, если qИ q = 4-6 a.e., удовлетворяют критерию $i < 9^{\circ}$. Этот важный космогоническом исключительно В аспекте прогноз Эверхарта теоретический проверен c помошью реальных комет в работе Томанова (2005).

§ 1.3. Статистическая проверка гипотезы Лапласа

Согласно предположению, изложенному (Радзиевский, Томанов, 1977), захват комет по схеме Лапласа носил характер практически единовременного акта, связанного с прохождением Солнца через астероидальное облако. цитированной работе были выведены формулы, позволяющие определить все элементы орбиты захваченной кометы в функции положения планеты в момент захвата ядра и начальной скорости последнего. В этой же работе были найдены радиус и положение центра «прицельного яблока», при прохождении через которое ядро захватывается на орбиту с большой полуосью $a < a_0$, где a_0 – большая полуось, соответствующая границам «яблока». Далее займемся сравнением теоретических результатов фактически наблюдаемой картиной, используя для этой цели статистический материал, описанный в (Радзиевский, Томанов, дополненный 32 вновь открытыми содержащий, таким образом, 500 орбит почти параболических комет с периодом P > 500 лет.

Первый вывод, вытекающий из гипотезы захвата комет планетами, состоит в том, что один из узлов каждой кометы должен лежать в районе орбиты, захватившей ее планеты. Необходимо подчеркнуть, что совершенно аналогичный и даже еще более резко выраженный эффект должен наблюдаться в случае извержения комет планетами или их спутниками.

Фактически этот феномен отсутствует. Узлы орбит комет концентрируются в районе орбиты Земли, что несомненно связано с влиянием условий видимости. Таким образом, мы стоим перед альтернативой: либо неверна гипотеза захвата комет планетами и тем более гипотеза их извержения внешними планетами, либо узлы орбит подвержены весьма быстрому возмущению.

В связи с этим выводом необходимо рассмотреть в сравнительном плане быстроту изменения оскулирующих элементов орбит долгопериодических комет.

Поскольку эти объекты большую часть своей жизни проводят в районе афелия, для грубо ориентировочного решения

поставленной задачи мы можем положить истинную аномалию комет в среднем равной 180°.

Тогда уравнения Ньютона в обозначениях Дубошина (Дубошин, 1968) примут вид

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{r}{p} \sin \omega \csc i\tilde{W}, \qquad (1.34)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{r}{p} \cos \omega \widetilde{W} \,, \tag{1.35}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = S + \frac{r}{p}\sin\omega ctgi\widetilde{W}. \tag{1.36}$$

 Гелиоцентрическое расстояние узла при $e\cong 1$ определяется формулой

$$R_{AD} = 2q/\P \mp \cos \omega , \qquad (1.37)$$

откуда

$$\frac{dR_{A,D}}{dt} = \frac{2q}{1 \mp \cos \omega} \pm \frac{2q \sin \omega \omega}{\left(\mp \cos \omega \right)^2}.$$
 (1.38)

Наконец, из (1.34) и (1.35) имеем

$$\frac{d\Omega}{di} = \operatorname{tg}\omega\operatorname{cosec}i. \tag{1.39}$$

Вследствие эффекта селекции (Радзиевский, Томанов, 1976) мы открываем кометы преимущественно с ω = 90°. Для таких комет, согласно (1.39), долгота узла Ω изменяется неизмеримо быстрее, чем угол наклона i, особенно если последний близок к 0 или 180°. Поэтому все корреляции, связанные с распределением Ω , нуждаются в осторожной интерпретации.

При $\omega = 90^\circ$ угол наклона не изменяется. Поэтому в дальнейшем мы будем придавать особый вес корреляциям, связанным с углом наклона орбит. Аргумент перигелия, как видно из (1.36), изменяется с большой скоростью у орбит с пологим наклоном, особенно при $\omega = 90^\circ$.

Наконец, из (1.38) следует, что гелиоцентрическое расстояние узла при $\omega = 90^{\circ}$ изменяется вдвое быстрее, чем перигельное расстояние, за счет первого члена, а за счет второго

члена может изменяться с бесконечно большой скоростью у орбит, совпадающих с плоскостью эклиптики.

Резюмируя эти соображения, можно сказать, что практически все элементы наименее подвержены возмущениям у орбит с крутым наклоном. В пользу этого заключения говорит и то обстоятельство, что кометы, движущиеся по орбитам с $i=90^\circ$, очень недолго остаются вблизи плоскости эклиптики, где сосредоточено большинство возмущающих факторов. Исходя из изложенного, в нашей статистике мы будем в ряде случаев опираться на кометы с крутым наклоном орбит.

Таблица 1.2. Распределение узлов кометных орбит по расстоянию от Солниа

ΔR ,	0°	< <i>i</i> <	180°"	45	p		
a.e.	$n_{\scriptscriptstyle A}$	$n_{\scriptscriptstyle D}$	n_{A}/n_{D}	$n_{\scriptscriptstyle A}$	$n_{\scriptscriptstyle D}$	n_{A}/n_{D}	
0-2	265	265	1.00	158	174	0.91	0.19
2-4	97	84	1.15	67	48	1.39	0.04
4-6	30	23	1.30	22	13	1.69	0.06
2-6	127	107	1.19	89	61	1.46	0.01

Итак, вследствие эффекта селекции мы открываем преимущественно кометы, имеющие один из узлов в районе орбиты Земли. Образуем вокруг Солнца три концентрические зоны с шириной кольца 2 а.е. Первую из этих зон можно считать зоной Земли, третью — зоной Юпитера. Число узлов обеих категорий в каждой зоне указано в табл. 1.2.

Резкое преобладание узлов в зоне Земли нельзя объяснить захватом комет нашей планетой. Диаметр «прицельного яблока» для Земли не превосходит 50 000 км. Поэтому вероятность захвата Земли при одинаковой v_{∞} на пять порядков меньше, чем для Юпитера.

Исходя из гипотезы захвата комет Юпитером, мы должны считать, что узлы в зоне Земли являются либо «холостыми» (т. е. противоположными тем, в которых произошел захват), либо «рабочими», но возмущенными. Вероятность возмущения у

каждого из узлов одинакова, вероятность же захвата в среднем одинакова только у всех захваченных комет с перигелийным расстоянием $0.4 \le q \le 5.2$ а.е. (см. табл. 1.3). Фактическое среднее значение q у всех почти параболических комет составит ~ 1 a.e. Грубо говоря, «приведенный» верхний предел q открытых комет равен 2 а.е. Если учитывать захват комет с $q \le 2$ а.е., то вероятность захвата в восходящем узле окажется значительно большей, чем в нисходящем: при $v_{\infty} = 0.5u$ – в 3 раза, а при $v_{_{\infty}} = u - в$ 18 раз. Таким образом, у подавляющего большинства захваченных Юпитером и открытых наблюдателями, рабочим узлом был восходящий. Этот вывод превосходно подтверждает табл. 1.2. Отношение $n_{_A}/n_{_D}$ у орбит всех наклонов в первой зоне случайно оказалось равным единице. это отношение монотонно растет к третьей Следовательно, какая-то доля восходящих узлов сохранила следы своего происхождения. Если данная интерпретация верна, то обнаруженный нами эффект должен усилиться у орбит с крутым наклоном. Табл. 1.2 подтверждает и этот вывод. У орбит с наклоном $45^{\circ} < i < 135^{\circ}$ в первой зоне уменьшилось отношение $n_{\scriptscriptstyle A} \, / \, n_{\scriptscriptstyle D}$. Восходящие узлы таких орбит, как менее подверженные возмущениям, не успели переместиться из зоны захвата в зону Земли. В зоне же захвата восходящих узлов оказалось в полтора раза больше, чем нисходящих.

В последнем столбце табл. 1.2 приводится вероятность того, что соотношение чисел $n_{\scriptscriptstyle A}$ и $n_{\scriptscriptstyle D}$ для орбит с крутым наклоном является случайным. Вычислялась она по формуле

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{\sqrt{n}} e^{-t^2/2} dt - \int_{-\infty}^{\frac{\Delta n}{\sqrt{n}}} e^{-t^2/2} dt \right],$$

где $n = n_{\scriptscriptstyle A} + n_{\scriptscriptstyle D}$, $\Delta n = n_{\scriptscriptstyle A} - n_{\scriptscriptstyle D}$.

Трудно не признать закономерностью явление, вероятность случайности которого имеет порядок 10^{-2} и которое обнаруживается и видоизменяется в полном соответствии с теоретическим прогнозом.

Таблица 1.3. Вероятность захвата комет и параметры их параболических орбит в функции места захвата $(\lambda_{\rm C})$ начальной скорости (ν_{∞}) и наклона начальной орбиты (i_0)

	<i>q</i> , a.e.	8.0	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	5.6	5.6	2.5	2.4	5.2	5.2	5.2	5.2				5.1	4.8	4.3	3.6	3.1	5.6
	i	152°	155	157	158	159	160	160	158	156	152	145	136	1111	126	141	157	ı	1	ı	173	161	151	142	131	120
$v_{\infty}=u$; $i_0>90^\circ$	$K_z 10^{-18},$ $c_{\rm M}^{2/c}$	-51.0	-57.8	-64.8	-71.6	-78.0	-84.0	-88.0	-92.0	-93.0	-90.0	-82.3	-69.0	-51.0	-85.0	-113.0	-133.0	1	1	1	-143.0	-131.0	-115.0	-95.2	-73.7	-51.0
<i>1</i> _∞	W	1.85	1.73	1.63	1.50	1.36	1.27	1.23	1.20	1.20	1.27	1.42	1.53	1.85	1.30	0.91	0.62	-	-	1	0.11	09.0	0.80	1.20	1.50	1.85
	<i>q</i> , a.e.	2.6	2.4	2.5	2.7	3.2	3.7	4.3	8.4	5.0	5.1	5.2	5.2	2.2	1.8	1.3	1.0	0.7	9.0	0.5	4.0	4.0	0.5	0.5	9.0	8.0
0	i	120°	107	94	83	75	70	69	69	72	77	98	26	125	113	106	101	100	102	107	116	125	134	142	148	152
$v_{\infty}=u; i_0<90^{\circ}$	$K_z 10^{-18},$ $c_{\rm M}^2/c$	-51.0	-28.4	-6.5	+12.5	+28.8	+40.8	+48.0	+49.5	+44.2	+31.2	+10.8	-17.2	-51.0	-33.2	-19.8	-11.9	-9.0	-9.9	-13.3	-18.2	-24.2	-30.6	-37.2	-44.2	-51.0
7	W	1.85	2.26	2.66	3.17	3.59	3.92	4.20	4.10	3.96	3.76	3.15	2.49	1.85	2.23	2.38	2.62	2.65	2.63	2.60	2.52	2.48	2.25	2.11	1.97	1.85
	<i>q</i> , a.e.	0.4	9.0	0.7	6.0	1.2	1.4	1.7	2.0	2.4	2.6	2.7	2.7	5.0	5.0	6.4	8.4	4.6	4.3	4.0	3.6	3.1	2.7	2.3	1.9	1.5
°06	i	108°	116	124	130	133	136	137	135	132	127	119	109	26	107	118	126	132	135	136	135	132	127	119	110	100
$v_{\infty}=0.5u; i_0>90^{\circ}$	$K_z 10^{-18},$ cm ² /c	-12.7	-21.1	-31.1	-39.6	-47.7	-55.0	-60.4	-64.0	-64.0	-58.5	-49.8	-33.5	-12.7	-41.5	-65.0	-81.3	-90.5	-93.3	-91.0	-84.0	-74.0	-61.4	-46.5	-29.9	-12.7
7	W	1.00	0.92	0.84	0.79	0.70	0.62	0.58	0.54	0.54	0.58	0.67	0.78	1.00	0.74	0.57	0.45	0.38	0.35	0.39	0.42	0.51	09.0	0.70	0.84	1.00
	<i>q</i> , a.e.	1.5	1.7	2.0	2.3	2.8	3.1	3.6	4.1	4.5	4.7	4.8	4.9	2.7	2.6	2.4	2.2	1.8	1.5	1.2	1.0	8.0	9.0	0.5	0.4	0.4
°06>	i	100°	87	9/	89	62	28	57	58	61	99	73	83	95	85	9/	89	63	61	09	62	29	74	83	95	108
$v_{\infty}=0.5u; i_0<90^{\circ}$	$K_z 10^{-18},$ cm ² /c	-12.7	4,4	+20.9	+35.9	+48.4	+58.7	+65.5	+68.0	+64.9	+55.8	+39.8	+15.8	-12.7	+8.0	+24.2	+33.1	+38.6	+38.6	+34.8	+29.3	+22.3	+14.2	+5.6	-3.6	-12.7
$^{\prime}_{8}$	W	1.00	1.21	1.39	1.56	1.74	1.88	2.02	2.15	2.05	1.85	1.65	1.34	1.00	1.29	1.47	1.57	1.62	1.59	1.56	1.48	1.37	1.30	1.23	1.11	1.00
	γc	0°	15°	30°	45°	°09	75°	$^{\circ}06$	105°	120°	145°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°

Необходимо подчеркнуть, что в рамках гипотезы извержения рождение кометы в любом из узлов является равновероятным. Поэтому эффект, содержащийся в табл. 1.2, с позиций этой гипотезы совершенно необъясним. Невозможно его интерпретировать и на основе анализа условий видимости.

Перейдем теперь к сравнению теоретического прогноза и фактического распределения других элементов кометных орбит. В табл. 1.3 приведены значения проекции на ось эклиптики момента количества движения K_z , угол наклона орбиты i и перигельное расстояние комет в функции места их захвата Юпитером и начальной скорости ядер для двух вариантов последней: $v_{\infty}=0.5u$ и $v_{\infty}=u$. Кроме того, в этой таблице дается вероятность захвата w в условных единицах. Для $\lambda_c=0^\circ$ ($\beta_0=90^\circ$) при $v_{\infty}=0.5u$ принято w=1. Оценка абсолютного значения этой единицы приводится в (Радзиевский, Томанов, 1977). Полезно напомнить, что место захвата характеризуется эклиптической долготой Юпитера в момент захвата, которая отсчитывается от проекции на эклиптику солнечного апекса. В этой системе долгота точки весеннего равноденствия составляет 90°.

На основании данных табл. 1.3 было вычислено отношение числа орбит с прямым и обратным движением по формуле

$$n^+/n^- = \sum w^+/\sum w^-,$$
 (1.40)

где $\sum w^+$ — сумма вероятностей захвата комет с прямой конечной орбитой, а $\sum w^-$ — с обратной. Это отношение должно быть одним из наиболее надежных критериев для выбора начальных условий по двум причинам. Во-первых, как уже отмечалось выше, наклон орбит подвержен возмущениям в гораздо меньшей мере, чем Ω , и, во-вторых, этот параметр повидимому, индеферентен к эффектам селекции. Приведем один пример в подтверждение данной мысли. Кометы с ω < 180° открываются в северном полушарии в два раза чаще, чем с ω > 180°, а в южном — наоборот (Радзиевский, Томанов, 1976).

Кометы же с $i < 90^{\circ}$ и с $i > 90^{\circ}$ практически одинаково часто открываются как в северном, так и южном полушарии Земли.

Далее на основании табл. 1.3 были определены средние значения K_z отдельно для орбит с прямым и обратным движением по формулам

$$\overline{K}_{z}^{+} = \sum w^{+} K_{z}^{+} / \sum w^{+} ; \ \overline{K}_{z}^{-} = \sum w^{-} K_{z}^{-} / \sum w^{-} .$$
 (1.41)

По аналогичным формулам были вычислены средние значения q и i также отдельно для прямых и обратных орбит.

Указанные вычисления проделаны для всех захваченных комет без ограничения q, а затем для комет с $q \le 2$ а.е., поскольку именно такие кометы мы преимущественно открываем.

 Таблица
 1.4.
 Теоретические
 и фактические
 значения
 некоторых

 параметров орбит долгопериодических комет

a ae	ν_{∞}	n^{+}	$\overline{K}_z 10^{-1}$	⁸ см ² /с	\overline{q}_{i} ,	a.e.	$\bar{i}-90^{\circ}$			
q_{max} , a.e.	и	\overline{n}^-	i < 90°	<i>i</i> > 90°	i < 90°	<i>i</i> > 90°	i < 90°	<i>i</i> > 90°		
5.2	0.5	1.78	+37.8	-43.9	2.46	2.52	-22°	+35°		
	1.0	0.47	+34.6	-49.6	4.3	2.0	-15°	+37°		
2.0	0.5	1.49	+24.6	-27.9	1.27	1.04	-21°	+27°		
	1.0	0.00	-	-33.5	-	0.87	-	+37°		
$\operatorname{Bce} q$	-	0.89	+20.7	-22.3	1.03	1.01	-35.5	+37.5		
0.4 < q < 2	-	0.99	+30.7	-34.3	0.96	0.92	-32.8	+39.0		

Результаты этих вычислений приведены в табл. 1.4 для двух вариантов начальной скорости v_{∞} . Испытанию была подвергнута также начальная скорость $v_{\infty}=1.5u$. Соответствующие результаты нами не приводятся, так как они оказались полностью негативными: вероятность захвата крайне мала, все захваченные кометы без ограничения q должны иметь обратные орбиты. В последних двух строчках табл. 1.4 приведены фактические значения рассматриваемых параметров, вычисленных для всех 500 комет и для комет с $0.4 \le q \le 2.0$ а.е.

Основные выводы, которые можно сделать из табл. 1.4, состоят в следующем:

- 1) судя по самому надежному критерию (отношение n^+/n^-) эффективная начальная скорость ядер была ~10 км/сек;
- 2) при любой начальной скорости имеет место некоторая асимметрия средних величин \overline{K}_z , \overline{q} и \overline{i} для орбит с прямым и обратным движением. Характер этой асимметрии таков, что ожидать подтверждения теоретических выводов статистическим материалом за счет эффектов селекции не приходится. В самом деле, если у орбит с обратным движением модуль K_{z} несколько больше, чем у орбит с прямым движением, то естественно ожидать, что и среднее значение q у первых будет больше, чем у вторых. Теория, однако, предсказывает, что у орбит с обратным движением $|K_1|$ больше, а q меньше, чем у орбит с прямым теоретический прогноз движением. Этот подтверждается материалом, причем указанная асимметрия статистическим усиливается для комет, взятых в тех же пределах по q, что и для теоретических подсчетов средних величин. То обстоятельство, что фактические значения K_{\perp} и q (для комет без ограничения q) несколько меньше ожидаемых, а орбиты и прямые и обратные являются несколько более пологими, вполне соответствует эффектам селекции.

Посмотрим теперь, какие еще выводы из табл. 1.3 могут быть подвергнуты статистической проверке.

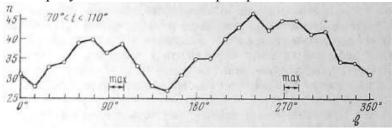


Рис. 1.5. Число восходящих узлов

Как уже отмечалось в работе (Радзиевский, Томанов, 1977), характер узла у средней (по всему «прицельному яблоку») конечной орбиты совпадает с рабочим узлом начальной орбиты. У прямых начальных орбит все восходящие узлы имеют эклиптическую долготу $180^{\circ} < \Omega < 360^{\circ}$. Иными словами, если

рабочий узел — нисходящий (0° < λ_c < 180°), то долгота восходящего узла на 180° отличается от долготы точки захвата. Если же рабочий узел восходящий (что вероятнее), то его долгота совпадает с долготой точки захвата. У обратных начальных орбит все обстоит наоборот, кроме вероятности захвата в восходящем узле при $q \le 2$ а.е.

Как видно из табл. 1.3, смена знака K_z у комет с $q \le 2$ происходит при $0^\circ < \lambda_c < 15^\circ$ ($180^\circ < \Omega < 195^\circ$) и при $330^\circ < \lambda_c < 345^\circ$ ($330^\circ < \Omega < 345^\circ$). Значит, в этих местах должны концентрироваться узлы орбит с наклоном $i = 90^\circ$, т. е. узлы, наименее поверженные возмущениям.

Для проверки данного вывода были привлечены орбиты с наклоном $70^{\circ} < i < 110^{\circ}$. Для этих орбит было подсчитано число восходящих узлов $n_{\scriptscriptstyle A}$, содержащихся в пределах квадранта эклиптики с вершиной $\overline{\Omega}$. Результаты подсчета приведены на рис. 1.5. По оси ординат здесь отложены числа $n_{\rm A}$, а по оси абсцисс – долготы вершин квадрантов с шагом в Предсказанное положение максимумов удовлетворительно совпадает с фактическими максимумами нашей кривой. Если данная корреляция действительно связана с захватом комет Юпитером, то ею же прекрасно объясняется и хорошо известный феномен концентрации кометных перигелиев вблизи апекса и антиапекса Солнца. В самом деле, если орбита имеет наклон $i = 90^{\circ}$ и долготу восходящего узла 0° или 180° , то перигелий орбиты неизбежно будет совпадать по долготе с одним из ее узлов.

Между тем эффект концентрация перигелиев кометных орбит вблизи эклиптических долгот 270° и 90° (в нашей системе 0° и 180° соответственно) до недавнего времени объяснялся условиями видимости: открывать кометы в районе долготы 270° северянам наиболее удобно в то время года, которое вообще является наиболее благоприятным для открытия комет в климатическом отношении.

Работа (Радзиевский, Томанов, 1970) не оставляет места для сомнений в ошибочности этого объяснения. В цитируемой работе было показано, что преобладание перигелиев в районе апекса и антиапекса фактически имеет место у комет, открытых в каждом квартале года.

Ряд статистических эффектов в распределении параметров кометных орбит был указан в работах (Радзиевский, Томанов, 1973; Томанов, 1976) при попытке обоснования гипотезы столкновительного захвата. Наиболее належные ИЗ ЭТИХ эффектов главным связаны \mathbf{c} следствием столкновительного захвата: все орбиты захваченных комет должны проходить через вектор пекулярного движения Солнца \overline{v}_{Θ} , разумеется, с некоторой дисперсией.

Однако нетрудно видеть, что таким же свойством должны обладать орбиты комет, захваченных по схеме Лапласа. В самом деле, все начальные орбиты должны проходить через вектор \bar{v}_{Θ} также с некоторой дисперсией. Но наклон конечных орбит отличается от наклона начальных орбит незначительно. Пользуясь формулами работы (Радзиевский, Томанов, 1977), можно было бы показать, что

$$\left| \arctan \frac{\dot{z}_z}{\dot{x}_0} - \arctan \frac{\dot{z}}{\dot{x}} \right| < 10^{\circ}.$$

Таким образом, и в этом случае конечные орбиты должны содержать в своей плоскости вектор v_{θ} с дисперсией порядка 10° , если отвлечься от возмущений. Этим обстоятельством и объясняется чрезвычайно существенный статистический эффект – повышение концентрации перигелиев в сегментах небесной сферы с вершинами в апексе и антиапексе, который должен наблюдаться даже при совершенно случайном положении перигелия в плоскости каждой орбиты, если последние проходят через вектор v_{θ} .

Рыхлая структура кометных ядер, подверженных интенсивной сублимации при малейшем их нагревании, вполне соответствует условиям конденсации этих ядер в недрах межзвездной туманности.

Обилие распавшихся комет, породивших тысячи метеорных роев, вполне покрывает дефицит короткопериодических комет, которых должно быть захвачено в несколько раз больше, чем долгопериодических.

Наконец, необходимо подчеркнуть, что результаты наших работ не противоречат идеям Оорта о существовании кометного облака вокруг Солнечной системы.

Это облако сферической формы по существу и образуют тысячи долгопериодических комет, проводящих большую часть жизни в районе своих афелиев.

Что же касается современных короткопериодических комет, которые принято считать молодыми, то они вполне могут быть продуктом возмущений почти параболических комет в соответствии с теоретическими исследованиями Е.И. Казимирчак-Полонской (1971) и других авторов.

Элементы орбит комет, захваченных по схеме Лапласа, практически могут быть определены с использованием следующего алгоритма. Если комета проникает глубоко в сферу влияния планеты, то в результате пертурбационного маневра в поле тяготения планеты комета может быть переведена с гиперболической на замкнутую гелиоцентрическую орбиту. Определим условия захвата и выразим элементы кометных орбит после захвата при следующих приближениях:

- 1. Эклиптические координаты апекса пекулярного движения Солнца составляют $L_A = 270^0, B_A = 53^0,5$.
- 2. Поток кометных ядер идет в Солнечную систему со скоростью Солнца относительно межзвездного кометного облака V_{∞} из радианта, совпадающего с апексом Солнца.
- 3. Планеты двигаются по круговым орбитам радиусом R со скоростью

$$V_{\scriptscriptstyle 1} = \sqrt{\frac{\mu}{R}} \,, \tag{1.42}$$

где μ – гравитационный параметр Солнца.

4. Радиус сферы влияния планеты относительно Солнца определяется формулой

$$\rho = 1.15R_{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{m}{M}},$$
 (1.43)

где т и М – массы планеты и Солнца.

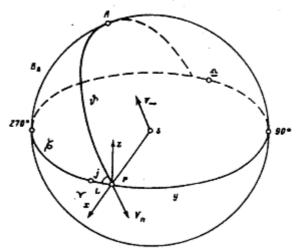


Рис. 1.6. К выводу кинетических соотношений при захвате. Обозначения: A — апекс Солнца, P — планета, S — Солнце.

- 5. Движение кометы внутри сферы влияния будем описывать в приближении задачи двух тел. За время движения кометы внутри сферы влияния изменением вектора орбитальной скорости планеты $V_{\scriptscriptstyle 1}$ пренебрежем.
- 6. Примем, что после выхода из сферы влияния планеты комета движется по коническому сечению относительно Солнца.
- 7. Скорость, которую имеет комета при пересечении орбиты планеты, определяется из интеграла энергии

$$V_2^2 = \frac{2\mu}{R} + V_\infty^2 \,. \tag{1.44}$$

Угловое расстояние $\mathcal G$ планеты P от солнечного апекса A (рис. 1.6) находится из прямоугольного сферического треугольника $\mathbf A$ $\mathbf F$ $\mathbf P$:

$$\mathcal{G} = \arccos(-\cos B_A \sin L), \qquad (1.45)$$

где L — гелиоцентрическая долгота планеты. Из этого же сферического треугольника можем записать соотношения:

$$\cos j = \frac{\cos B_A \cos L}{\sin \theta},\tag{1.46}$$

$$\sin j = \frac{\sin B_{A}}{\sin 9} \,. \tag{1.47}$$

из которых определяется наклон j к эклиптике начальной гелиоцентрической орбиты кометы до входа в сферу влияния.

Радиальный V_r и трансверсальный V_n компоненты скорости V_2 даются формулами (Радзиевский, Томанов, 1973):

$$V_{r} = \frac{V_{\infty}}{2} \left[\left(-\cos\theta \right) - \left(+\cos\theta \right) \left[1 + \frac{4\mu}{RV_{\infty}^{2} \left(+\cos\theta \right)} \right], (1.48)$$

$$V_{n} = \frac{V_{\infty}}{2} \sin\theta \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\mu}{RV_{\infty}^{2} \left(+\cos\theta \right)}} \right]. (1.49)$$

Введем систему координат P_{xyz} (рис.1.6) с началом в планете P так, что ось x направлена по радиусу-вектору от Солнца S, ось y всегда совпадает с направлением движения планеты, а ось z направлена на прямой полюс орбиты планеты. В этой системе компоненты скоростей V_1 и V_2 будут выражаться так:

$$\dot{x}_1 = 0, \dot{x}_2 = V_r,
\dot{y}_1 = V_1, \dot{y}_2 = V_n \cos j,
\dot{z}_1 = 0, \dot{z}_2 = -V_n \sin j.$$
(1.50)

Планетоцентрическая скорость кометы U может быть найдена из выражения

$$U^{2} = V_{r}^{2} + \sqrt[4]{\cos j} - V_{1} + V_{n}^{2} \sin j.$$
 (1.51)

Если ψ угол между векторами V_1 и V_2 , то

$$U^2 = V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos\psi$$
.

Поскольку проекции скоростей V_2 и V_n на ось y равна $V_2\cos\!\psi = V_n\cos j$, то

$$U^{2} = V_{1}^{2} + V_{2}^{2} - \frac{2V_{1}V_{n}\cos B_{A}\cos L}{\sin \theta}.$$
 (1.52)

Формулы (1.51) и (1.52) могут быть использованы для промежуточной проверки.

Переходя к сферическим планетоцентрическим координатам, можем записать координаты x_0, y_0, z_0 точки входа в сферу влияния и составляющие $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ планетоцентрической скорости в этой точке:

$$x_{0} = \rho \sin\theta \cos\varphi, \quad \dot{x}_{0} = V_{r},$$

$$y_{0} = \rho \sin\theta \sin\varphi, \quad \dot{y}_{0} = V_{n} \cos j - V_{1},$$

$$z_{0} = \rho \cos\theta, \qquad \dot{z}_{0} = -V_{n} \sin j.$$
(1.53)

Используя интегралы площадей, получим:

$$y_{0}\dot{z}_{0} - z_{0}\dot{y}_{0} = C_{1},$$

$$z_{0}\dot{x}_{0} - x_{0}\dot{z}_{0} = C_{2},$$

$$x_{0}\dot{y}_{0} - y_{0}\dot{x}_{0} = C_{3}.$$
(1.54)

Направление на перипланет определяется интегралами Лапласа:

$$f_{x} = -\frac{\mu' x_{0}}{\rho} + C_{3} \dot{y}_{0} - C_{2} \dot{z}_{0},$$

$$f_{y} = -\frac{\mu' y_{0}}{\rho} + C_{1} \dot{z}_{0} - C_{3} \dot{x}_{0},$$

$$f_{z} = -\frac{\mu' z_{0}}{\rho} + C_{2} \dot{x}_{0} - C_{1} \dot{z}_{0},$$
(1.55)

где μ' – гравитационный параметр планеты.

Для контроля может быть использовано соотношение

$$C_1 f_x + C_2 f_y + C_3 f_z = 0.$$
 (1.56)

Если координаты перицентра x', y', z', то совместное решение уравнений

$$f_x(x'-x_0)+f_y(y'-y_0)+f_z(z'-z_0)=0,$$
 (1.57)

$$\frac{x'}{f_x} = \frac{y'}{f_y} = \frac{z'}{f_z} = t \tag{1.58}$$

дает координаты x, y, z точки на выходе кометы из сферы влияния

$$x = \frac{2f_{x} \left(\int_{x} x_{0} + f_{y} y_{0} + f_{z} z_{0} \right)}{f_{x}^{2} + f_{y}^{2} + f_{z}^{2}} - x_{0},$$

$$x = \frac{2f_{y} \left(\int_{x} x_{0} + f_{y} y_{0} + f_{z} z_{0} \right)}{f_{x}^{2} + f_{y}^{2} + f_{z}^{2}} - y_{0},$$

$$x = \frac{2f_{z} \left(\int_{x} x_{0} + f_{y} y_{0} + f_{z} z_{0} \right)}{f_{x}^{2} + f_{y}^{2} + f_{z}^{2}} - z_{0}.$$
(1.59)

В сфере влияния планеты комета движется по гиперболической орбите. Входя в сферу влияния планеты с относительной скоростью U, комета покидает сферу с той же самой по абсолютной величине скоростью. Из интегралов энергии и площадей следует, что угол γ поворота вектора скорости U определяется выражением (Шор, 1973):

$$\sin\frac{\gamma}{2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d^2 U^4}{{u'}^2}}},\tag{1.60}$$

где d — прицельное расстояние — расстояние асимптоты гиперболы от центра планеты.

Если $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ компоненты относительной скорости кометы на выходе из сферы влияния планеты, то угол γ между векторами U на входе и выходе можно найти из формулы:

$$\cos \gamma = \frac{\dot{x}_0 \dot{x} + \dot{y}_0 \dot{y} + \dot{z}_0 \dot{z}}{U^2}.$$
 (1.61)

Совместное решение (1.60) и (1.61) дает

$$\cos \gamma = \frac{b-1}{b+1},\tag{1.62}$$

где
$$b = \frac{C^2 U^2}{4t^2}$$
, $C = dU$, $C^2 = C_1^2 + C_2^2 + C_3^2$.

Обозначая $U^2\cos\gamma=m$, перепишем (1.61) в форме $x_{_0}\dot x+\dot y_{_0}\dot y+z_{_0}\dot z=m\ . \eqno (1.63)$

Моменты количества движения (постоянные площадей) на выходе из сферы влияния остаются такими же, как и на входе:

$$y\dot{z} - z\dot{y} = C_1,$$

$$z\dot{x} - x\dot{z} = C_2,$$

$$x\dot{y} - y\dot{x} = C_3.$$
(1.64)

Решая совместно (1.63) с первым и вторым уравнением из (1.64), получим составляющие относительной скорости на выходе из сферы влияния:

$$\dot{x} = \frac{C_{1}x\dot{y}_{0} + z C_{2}\dot{z}_{0} + mx + C_{2}y\dot{y}_{0}}{z x_{0} + y\dot{y}_{0} + z\dot{z}_{0}},
\dot{y} = \frac{y nz - C_{2}\dot{x}_{0} - C_{1} x_{0} + z\dot{z}_{0}}{z x_{0} + y\dot{y}_{0} + z\dot{z}_{0}},
\dot{z} = \frac{C_{1}z\dot{y}_{0} + z nx - C_{2}\dot{x}_{0}}{z x_{0} + y\dot{y}_{0} + z\dot{z}_{0}}.$$
(1.65)

Производя параллельный перенос системы координат P_{xyz} в центр Солнца S, можем записать в гелиоцентрической системе S_{xyz} координаты X,Y,Z и составляющие \dot{X},\dot{Y},\dot{Z} скорости кометы:

$$X = R + x, \quad \dot{X} = \dot{x},$$

$$Y = y, \qquad \dot{Y} = \dot{y} + V_{1},$$

$$Z = z, \qquad \dot{Z} = \dot{z}.$$
(1.66)

Поскольку уравнениями (1.66) задаются начальные условия в системе SXYZ, то теперь можно приступить к определению элементов гелиоцентрической орбиты кометы. Поскольку эта задача подробно описана, например Г.Н. Дубошиным (1968), то последующий алгоритм приводится в сокращенном виде.

Сначала необходимо определить гелиоцентрическое расстояние и скорость кометы на выходе из сферы влияния планеты

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \tag{1.67}$$

$$V = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2}, \tag{1.68}$$

а затем вычислить постоянные площадей (k_1,k_2,k_3,k) по уравнениям, аналогичным (1.54). Направление на перигелий

определяется интегралом Лапласа (F_x , F_y , F_z ,F) (в уравнениях (1.55) следует использовать μ).

Все элементы орбит вычисляются по формулам, приведенным в (Дубошин, 1968): наклон к эклиптике $i(k_1,k_2,k_3)$, долгота восходящего узла $\Omega(k_1,k_2)$, аргумент перигелия $\omega(k_1,k_2,k_3,F_x,F_y,F_z)$, параметр орбиты $p(k,\mu)$, большая полуось a, перигелийное расстояние q, широта B_n и долгота L_n перигелия.

Таблица 1.5. Характеристики планет

Планета	Расстояние	Орбитальная	Радиус сферы	Гравитацион-
	от Солнца,	скорость,	влияния,	ный
	R (a.e.)	$V_1 \times 10^{-3}$,	ho , (M)	параметр,
		(mc^{-1})		μ' , (M^3c^{-2})
Меркурий	0.387099	47.87	3.605309×10^{8}	2.203208×10 ¹³
Венера	0.723332	35.02	1.702424×10^9	3.248588×10^{14}
Земля	1.000000	29.78	2.501276×10^9	3.986005×10^{14}
Mapc	1.523691	24.13	1.801158×10^9	4.282829×10 ¹³
Юпитер	5.202803	13.06	8.805779×10^{10}	1.267120×10 ¹⁷
Сатурн	9.53884	9.64	1.080710×10 ¹¹	3.793410×10 ¹⁶
Уран	19.1819	6.80	1.160760×10 ¹¹	5.803159×10 ¹⁵
Нептун	30.0578	5.43	1.941272×10 ¹¹	6.871308×10 ¹⁵

табл. 1.5 указаны основные параметры планет, вычислений используемые ДЛЯ ПО приведенному алгоритму. Довольно громоздкие вычисления по захвату комет планетами проводились на ЭВМ при следующих условиях. Задавались точки входа комет в сферу влияния планеты через сферические координаты ρ и θ . Шаг по φ равен 45°, по θ – 5°, $(0^{\circ} \le \theta < 90^{\circ})$. Таким образом определялись 144 точки входа в сферу влияния условных межзвездных комет. Долгота планеты Lдавалась с шагом 15°. При этих условиях вычислялось 3456 орбит, которые могли бы образоваться при захвате одной планетой. Из всего массива орбит на печать выводились элементы орбит либо с минимальными, либо с максимальными значениями эксцентриситета, но при условии e<1. С помощью формулы Эпика

$$d > R \left(1 + \frac{2\mu'}{U^2 R} \right)^{1/2},$$

где R — радиус орбиты планеты, d — прицельное расстояние, μ' — гравитационный параметр планеты, исключались орбиты, которые могли бы «пересекать» тело планеты.

- 1. Все планеты Солнечной системы обладают потенциальными возможностями к захвату межзвездных комет. Для захвата необходима малая относительная скорость Солнца и облака межзвездных комет. Верхний предел V_{∞} (в км/с) по отношению к планетам следующий: Меркурий 5,3; Венера 6,2; Земля 5,5; Марс 3,0; Юпитер 6,2; Сатурн 3,7; Уран 1,9; Нептун 1,6 км/с.
- 1.6 и 1.7 приведены элементы захваченных Венерой и Юпитером, в функции места захвата долготы планеты L, для двух значений V_{∞} . При $V_{\infty} = 3$ км/с захват может осуществляться вдоль всей орбиты планеты. При $V_{\rm m} = 5 \, {\rm km/c}$ область захвата существенно сокращается. Захват Юпитером в этом случае может реализоваться, пока планета движется на долготах от 330° до 30° (табл. 1.7). Область захвата Венерой несколько больше _ табл. 1.6. Это обстоятельство позволяет оценить в сравнительном плане захвата различными планетами. Наши предварительные расчеты показывают, что «родительскими» планетами долгопериодических комет в основном могут быть четыре планеты земной группы, а не Юпитер, как это раньше считалось.
- 3. Местом захвата является нисходящий узел кометной орбиты, долгота которого практически совпадает с долготой планеты (табл. 1.6, 1.7). Захвата в восходящем узле быть не может, поскольку межзвездные кометы идут в Солнечную систему из радианта, находящегося в северном эклиптическом

полушарии (широта апекса $B=53^{\circ},5$, долгота $L=270^{\circ}$). После захвата наклон орбиты меняется незначительно. Таким образом, нисходящий узел — «место рождения» кометы, точка, откуда комета стартует на гелиоцентрическую орбиту. Заметим, что у орбит реальных долгопериодических комет узлы концентрируются к орбитам планет земной группы (Томанов, 1992).

Таблица 1.6. Теоретические элементы орбит комет, захваченных Венерой (e- мин, $\mathcal{O}.=0)$

L	Ω	i	ω	$B_{{\scriptscriptstyle \Pi}}$	$L_{{\scriptscriptstyle \Pi}}$	e	<i>q</i> , a.e.	<i>a</i> , a.e.
				3 км/с				
0°	-0.°2	53.°6	86.°2	53.°4	263.°3	0.989	0.38	33.5
30	29.5	57.6	68.0	51.5	262.5	0.986	0.49	34.3
60	59.3	70.0	53.4	48.9	264.0	0.988	0.57	49.3
90	89.2	90.3	47.3	-47.4	269.5	0.994	0.60	93.2
120	119.1	110.7	52.7	-48.1	324.0	0.996	0.57	158.9
150	149.0	123.2	66.7	-50.3	20.8	0.997	0.49	186.3
180	179.0	127.3	84.7	-52.5	80.2	0.998	0.38	165.3
210	209.1	123.6	103.1	54.1	96.2	0.998	0.27	129.5
240	239.3	111.4	118.0	55.3	93.7	0.998	0.18	96.8
270	269.5	90.9	124.2	55.7	90.8	0.998	0.15	71.2
300	299.6	70.3	118.6	-55.8	151.3	0.996	0.18	50.3
330	329.7	57.7	104.3	-55.0	214.1	0.993	0.26	38.7
				5 км/с				
0	-0.2	53.7	82.5	53.0	257.2	0.995	0.40	80.9
30	29.5	57.6	64.0	49.3	257.0	0.995	0.51	94.4
60	59.3	70.0	49.1	45.2	260.8	0.999	0.59	1385.8
300	299.7	70.2	116.1	-57.8	154.3	0.999	0.19	403.7
330	329.7	57.6	101.2	-56.0	219.3	0.998	0.28	118.2

4. Каждая из планет Солнечной системы может производить только долгопериодические орбиты, о чем свидетельствуют значения элементов a, e, q (табл. 1.6, 1.7), характеризующих геометрические размеры и форму орбит. Перигелий должен быть всегда расположен внутри орбиты «родительской» планеты.

Короткопериодические кометы, по-видимому, могут образовываться в результате повторных тесных сближений долгопериодических комет, в основном с Юпитером (Томанов, 1992).

Таблица 1.7. Теоретические элементы орбит комет, захваченных Юпитером (e – мин, φ . = 0)

L	Ω	i	ω	B_{II}	L_{II}	e	<i>q</i> , a.e.	<i>a</i> , a.e.
				3 км/с				
0°	-2.°3	55.°1	84.°0	54.°6	257.°2	0.910	2.65	29.6
30	25.8	59.4	61.7	49.2	249.1	0.899	3.62	35.9
60	54.5	71.4	42.9	40.2	251.0	0.948	4.32	83.4
90	84.0	91.6	35.2	-35.2	265.1	0.988	4.57	373.6
120	113.2	112.4	39.4	-36.0	310.6	0.997	4.42	1282.7
150	142.2	125.7	53.2	-40.6	0.2	0.994	3.88	619.2
180	171.7	131.0	72.5	-46.1	56.0	0.989	3.03	281.5
210	202.2	129.0	93.9	58.0	105.9	0.987	2.08	158.2
240	233.8	118.1	113.3	54.1	101.4	0.987	1.31	99.2
270	265.7	97.0	123.1	56.2	96.2	0.953	0.99	67.6
300	296.4	74.7	118.5	-58.0	142.2	0.974	1.20	46.8
330	327.5	59.9	103.9	-57.2	211.2	0.948	1.80	34.4
				5 км/с				
0	-2.9	55.3	72.0	51.4	237.4	0.950	3.12	63.0
30	25.3	59.1	48.0	39.6	234.9	0.980	4.09	200.6
300	297.2	73.2	111.1	-63.3	154.1	0.991	1.43	161.5
330	328.3	58.9	94.4	-58.7	229.7	0.971	2.11	73.7

- 5. Числовые данные таблиц 1.6 и 1.7 об угловых элементах теоретических кометных орбит позволяют подтвердить закономерности между элементами орбит.
- а) Зависимость наклона от долготы восходящего узла (Томанов, 1975):

$$tgi = -\frac{tgB_{A}}{\cos\Omega}.$$
 (1.69)

б) Распределение восходящих узлов — число узлов на дуге эклиптики в пределах от Ω_1 до Ω_2 описывается формулой (Радзиевский, Томанов, 1977):

$$\Delta n = n_0 \left[\operatorname{rctg} \left(\operatorname{in} B_A \operatorname{tg} \Omega_2 \right) \right] \operatorname{arctg} \left(\operatorname{in} B_A \operatorname{tg} \Omega_1 \right)$$

Соответствующие таблицы и графики содержатся в работе (Томанов, 1975). На рис. 1.7 пунктирной линией дана теоретическая зависимость (1.69), сплошная линия — наблюдаемая зависимость $i(\Omega)$.

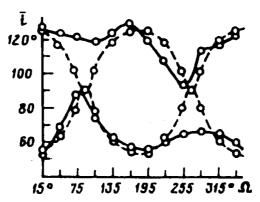


Рис. 1.7. Зависимость наклонений кометных орбит от долготы восходящего узла.

6. Распределение перигелиев. Как хорошо известно, проекции перигелиев долгопериодических комет на эклиптику имеют резко выраженную концентрацию около долгот 90° и 270°. Вокруг этого чрезвычайно важного космогонического феномена давно ведутся страстные дискуссии.

Указанную концентрацию долгот перигелиев С.К. Всехсвятский объяснял условиями видимости, В.В. Радзиевский для объяснения этого феномена ввел две гипотетические планеты, извергающие кометные ядра, двигающиеся в плоскостях, линия пересечения которых лежит над (под) точками 90° и 270° на эклиптике.

Из наших расчетов (табл. 1.6) следует, что при движении планеты на долготах $0^\circ < L < 90^\circ$ она может поставлять кометы с долготой перигелия $263^\circ < L_{_{II}} < 270^\circ$. Если $180^\circ < L < 270^\circ$, то $80^\circ < L_{_{II}} < 91^\circ$.

Предлагаемая модель захвата комет в Солнечную систему по-новому поставить вопрос οб долгопериодических комет и объяснить ряд закономерностей в Однако системе. В гипотезе межзвездного проблематичными происхождения комет остаются вопросы:

- 1. Существует ли межзвездное облако, расположенное в районе антиапекса Солнца и имеющее радиальную скорость $V_{\rm c} < + 6~{\rm km/c}$?
- 2. Какова пространственная плотность кометных ядер в межзвездных облаках?
- 3. Каков реликтовый химический состав кометных ядер и, следовательно, имеет ли место полная адекватность химсостава комет и межзвездной среды?

Хотя имеются и другие нерешенные вопросы в общей концепции межзвездного происхождения комет, выскажем наше предположение о возможной поэтапной эволюции кометной системы: первый этап - конденсация кометных ядер в недрах плотного газопылевого облака; второй этап – захват кометных ядер в Солнечную систему; третий этап – пребывание комет на долгопериодических гелиоцентрических орбитах, которого кометные орбиты изменяются в соответствии с диффузии; четвертый этап – захват комет на короткопериодические орбиты и последующая дезинтеграция кометных льдов, особенно в перигелийной части орбиты; финальный этап в жизни кометы – распад ядра с образованием метеорного роя или превращение в астероид, если ядро покроется пылевой коркой.

§ 1.4. Распределение перигелиев

распределения перигелийных направлений Изучение кометных орбит имеет почти двухсотлетнюю историю. Его выяснение направления на источник комет. Обзор наблюдательных теоретических И исследований ПО распределению перигелиев комет содержится в книге (Томанов, 1989). Сведения публикациях 0 ПО данному вопросу,

выполненных вплоть до 1960-х годов, ниже цитируются по (Томанов, 1989).

Первая работа по статистике перигелийных направлений принадлежит Боде (1812 г.), который исследовал распределение перигелиев 98 кометных орбит и нашел, что в созвездиях Близнецов и Рака расположено больше перигелиев, чем в направлениях к Стрельцу и Козерогу.

Брорзен (1852 г.), Ларднер (1853 г.), Хузо (1873 г.) исследовали распределение кометных орбит по эклиптической долготе перигелия λ_π и сделали вывод о наличии двух областей сгущения перигелиев: $200^\circ < \lambda_\pi < 282^\circ$ и $70^\circ < \lambda_\pi < 102^\circ$. Эти результаты интерпретируются влиянием движения Солнца на наблюдаемое распределение перигелиев. Кэррингтон (1861 г.) нашел некоторое преобладание перигелиев кометных орбит на полусфере, содержащей солнечный апекс.

Сведструп (1883 г.) применил в статистике перигелийных направлений метод эллипсоидального анализа. Оппенгейм (1922 г.), используя 306 орбит, получил эллипсоид дисперсии перигелиев кометных орбит со следующими направлениями главных осей:

$$\lambda_1 = 175^{\circ}.5, \ \beta_1 = +30^{\circ},0,$$

 $\lambda_2 = 87^{\circ}.3, \ \beta_2 = -3^{\circ}.0,$
 $\lambda_3 = 182^{\circ}.4, \ \beta_3 = -59^{\circ}.8.$

Позднее О.Ю. Шмидт (1945 г.) отметил, что главная ось эллипсоида Оппенгейма указывает на узел эклиптики в Галактике.

Пиккеринг (1911 г.) разбил кометы на две группы по яркости и нашел, что перигелии ярких группируются в области около значений $\lambda_1=277^\circ$, $\beta_1=+16^\circ$, а менее ярких при $\lambda_2=90^\circ$, $\beta_2=+9^\circ$. Согласно Эддингтону (1913 г.), существуют сгущения афелиев около точек с координатами $\lambda_1=97^\circ$, $\beta_1=+16^\circ$ и $\lambda_2=270^\circ$, $\beta_2=+70^\circ$.

Буржуа и Кокс (1934 г.) исследовали методом эллипсоидального анализа распределение перигелийных

расстояний. Позднее Гурник (1964 г.) и Витковский (1965 г.) проверили их результаты и пришли к выводу о существовании кометных потоков, аналогичных звездным Каптейна. Эти потоки имеют апексы движения: $\lambda_1 = 81^\circ, \ \beta_1 = -6^\circ; \ \lambda_2 = 261^\circ, \ \beta_2 = -26^\circ$. Натансон (1923 г.) из анализа распределения 345 перигелиев сделал вывод о существовании потока комет с вертексом в точке $\lambda = 273^{\circ}.1$, $\beta = +64^{\circ}.6$.

Оја (1975) использовал в статистике 73 кометы с первоначальными орбитами. Обнаружено, что перигелии концентрируются к плоскости, которая составляет с плоскостью Галактики угол 20° , а центр распределения перигелиев находится в 7° от солнечного апекса.

Потапов и Сухоплюева (1989) выполнили статистическую обработку координат перигелиев 613 долгопериодических комет и получили следующие результаты: максимум в распределении перигелиев по эклиптической долготе лежит в интервале долгот $260^{\circ}-280^{\circ}$. Координаты центра концентрации, найденные по методу Натансона, равны $\lambda = 265^{\circ}$, $\beta = +67^{\circ}$.

В 1970 г. Радзиевский и Томанов показали, что комет с долготой перигелия около 270° и 90° в любое время года фактически открывалось значительно больше, чем комет с долготой перигелия около 0° и 180°. Сделано заключение о несостоятельности объяснения неравномерности распределения перигелиев по долготе влиянием условий видимости.

Потапов и Томанов (1980) доказали, что значительная концентрация перигелиев кометных орбит около долготы 270° не зависит от условий видимости комет, связанных с широтным наблюдателей Отмечено, распределением на Земле. перигелии открытых наблюдателями, иминжо комет, концентрируются к точке с эклиптическими координатами $\lambda = 246^{\circ}.7 \pm 12^{\circ}.1$, $\beta = -30^{\circ}.4 \pm 4^{\circ}.8$, в то время как перигелии открытых "северянами", лежат направлении: В $\lambda = 273^{\circ}.2 \pm 8^{\circ}.6$, $\beta = +75^{\circ}.6 \pm 4^{\circ}.5$.

Радзиевский и Томанов (1982) исследовали вероятность W открытия кометы в зависимости от перигелийного расстояния q, плотности распределения перигелиев $\rho(q)$, геоцентрического расстояния перигелия Δ и фазового угла ε (угол между направлениями на Солнце и на комету в эпоху прохождения через перигелий). Получено

$$W : \Delta, q, \rho(q) = \frac{W_0(1 - \cos \varepsilon)}{\Delta^2 q^{4+x}},$$

где переменная x близка к единице. Теоретическое распределение перигелиев по фазовому углу описывается формулой $\Delta n = n_0 \csc \varepsilon (2 + \cos \varepsilon - \cos^2 \varepsilon) \Delta \varepsilon$.

Томанов (1976, 1977, 1979) показал наличие связи в ориентации кометных орбит с вектором пекулярного движения Солнца, обнаружил существование асимметрии относительно круга широт проходящего через апекс Солнца, в распределении перигелиев для комет с прямым и обратным движением.

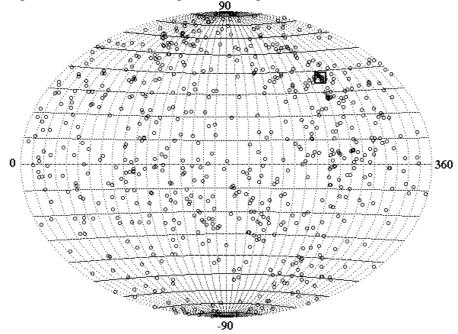


Рис.1.8. Проекции перигелиев на небесную сферу

Итак, на протяжении 185 лет система кометных перигелиев периодически подвергается исследованию с целью получить ответ на вопрос: «Откуда кометные ядра приходят в Солнечную систему?»

Далее для статистики используются 754 кометы с периодом P>200 лет из каталога Marsden, Williams (1998). На карте небесной сферы (рис. 1.8) с нанесенными перигелиями (N=754, эклиптическая система) просматриваются некоторые области сгущения перигелиев и области с их дефицитом.

Таблица 1.8. Распределение перигелиев по равновеликим площадкам

λ_{π}	345°-	15- 45	45- 75	75- 105	105- 135	135- 165	165- 195	195- 225	225- 255	255- 285	285- 315	315- 345	Σ
β_{π}	15°	43	13	103	133	103	193	223	233	203	313	343	
56°-90°	4	4	8	10	10	4	5	3	7	3	2	4	64
42-56	6	5	7	16	9	3	4	7	6	12	4	0	79
30-42	7	7	3	9	3	6	3	4	11	46	11	7	117
20-30	3	7	7	7	4	4	2	1	2	12	9	6	64
10-20	6	2	2	4	8	3	2	3	4	10	6	6	56
0-10	3	5	5	5	4	4	2	3	6	11	15	4	67
0-90	29	30	32	51	38	24	18	21	36	94	47	27	447
-10-0	2	6	4	11	7	8	3	8	4	9	6	5	73
-2010	1	3	4	6	8	8	7	7	3	4	5	2	58
-3020	1	5	2	4	6	9	7	12	7	7	2	1	63
-4230	1	0	2	4	4	3	1	6	1	7	3	1	33
-5642	2	2	2	6	0	0	4	3	5	9	6	3	42
-9056	6	5	5	3	1	2	1	1	2	6	5	1	38
-90-0	13	21	19	34	26	30	23	37	22	42	27	13	307
Σ	42	51	51	85	64	54	41	58	58	136	74	40	754

В табл. 1.8 дано распределение перигелиев по 144 равновеликим площадкам небесной сферы. При равновероятном распределении перигелиев на каждой площадке должно было бы содержаться 5,24±0,39 перигелия. Однако на четырех площадках

перигелии полностью отсутствуют, 12 площадок содержат всего по одному перигелию. С другой стороны, 59 площадок содержат 6 и более перигелиев. На 13 площадках расположено 10 и более перигелиев, особенно выделяется площадка с долготой $255^\circ < \lambda < 285^\circ$ и широтой $30^\circ < \beta < 42^\circ$, на которую проектируется 46 перигелиев. В том числе на этой площадке расположены 28 перигелиев короткоперигелийных (q < 0.01 а.е.) «царапающих» Солнце комет группы Крейца (на рис. 1.8 положение их перигелиев отмечено прямоугольником).

Элементы орбит комет Крейца очень похожи: долгота восходящего узла Ω лежит в интервале от 337° до 15°, среднее значение $\overline{\Omega}$ =357°.96; наклон i орбиты к эклиптике заключен и 145°, $\bar{i} = 143^{\circ}.3$; перигелийное между значениями 139° расстояние q лежит в интервале от 0.004 a.e. до 0.009 a.e.; а эксцентриситет $e \approx 1$. Перигелии всех орбит практически направлении: $\lambda = 282^{\circ}.7$, $\beta = 35^{\circ}.3$. находятся одном можно предположить, что диаметрально Следовательно, противоположная точка $\lambda = 102^{\circ}.7$, $\beta = -35^{\circ}.3$ – радиант комет группы Крейца, где вероятно пребывание источника данных комет.

Рассмотрим отдельно распределения перигелиев комет по долготе λ и широте β . Из табл. 1.8 видно, что существует концентрация перигелиев в районе эклиптических долгот $75^{\circ} < \lambda < 105^{\circ}$ и $255^{\circ} < \lambda < 285^{\circ}$. В распределении комет по долготе перигелия (рис. 1.9а) существуют два выраженных максимума: около 90° и 270°. При равномерном перигелиев каждый распределении ИЗ 24 на пятнадцатиградусных интервалов (рис. 1.9а) попадало бы $\bar{n} = 31.4 \pm 7.2$, однако на интервале $90^{\circ} < \lambda < 105^{\circ}$ перигелиев превышает среднее на 61 %, а на интервале $270^{\circ} < \lambda < 285^{\circ}$ – Ha 209 %.

Распределение перигелиев по широте представлено в табл. 1.9 и на рис. 1.96, где σ =N/S – плотность перигелиев на концентрических кольцах шириной $\Delta\beta$ = 10° и площадью S, N –

число перигелиев, \mathcal{G}_{E} — угловое расстояние от северного полюса эклиптики.

Наибольшая плотность перигелиев имеет место на широтах $\beta = 30^{\circ} \div 60^{\circ}$. В этом же интервале лежит широта солнечного апекса. В распределении перигелиев в функции $\sigma \, \Phi_{\scriptscriptstyle E} \,$ просматриваются три максимума и общее уменьшение плотности перигелиев от северного полюса эклиптики к южному (рис. 1.96).

Таблина 1.9.	Распределение комет по широте перигелиев
I HUJIIIHH III	

β	N	S	σ	β	N	S	σ
80°-90°	5	0.09	52.4	-10-0	78	1.09	71.
70-80	18	0.28	63.5	-2010	56	1.05	52.
60-70	30	0.46	64.8	-3020	60	0.99	60.
50-60	52	0.62	82.8	-4030	30	0.89	33.
40-50	52	0.77	67.2	-5040	29	0.77	37.
30-40	10	0.89	114.	-6050	21	0.62	33.
20-30	58	0.99	58.4	-7060	13	0.46	28.
10-20	60	1.05	56.7	-8070	16	0.28	56.
0-10	69	1.09	63.2	-9080	4	0.09	41.

Наиболее высокая концентрация перигелиев имеет место на долготах $255^{\circ} < \lambda_{\pi} < 285^{\circ}$. С другой стороны, в интервале этих долгот расположен апекс пекулярного движения Солнца, эклиптические координаты которого

$$\lambda_{\rm c} = 270^{\circ}; \beta_{\rm c} = +53.5^{\circ},$$
 (1.70)

и направление на центр Галактики

$$\lambda_G = 266^\circ; \beta_G = -5.5^\circ.$$
 (1.71)

Обе точки имеют важное космогоническое значение: кометные перигелии концентрируются к апексу, относительно центра Галактики происходит их сепарация (Потапов, Сухоплюева, 1989).

Чтобы уточнить координаты точки, к которой концентрируются перигелии, воспользуемся методом Натансона, согласно которому перигелии рассматриваются как материальные точки единичной массы, расположенные на сфере единичного радиуса. Центр инерции этой системы есть точка \mathbf{Q}_a , $\boldsymbol{\beta}_a$, в направлении которой наблюдается концентрация перигелиев, а расстояние от центра сферы до данной точки определяет степень концентрации. Координаты λ_a и $\boldsymbol{\beta}_a$ определяются из уравнений:

$$NR\cos\lambda_{a}\cos\beta_{a} = \sum\cos\lambda_{\pi_{i}}\cos\beta_{\pi_{i}},$$

$$NR\sin\lambda_{a}\cos\beta_{a} = \sum\sin\lambda_{\pi_{i}}\cos\beta_{\pi_{i}},$$

$$NR\sin\beta_{a} = \sum\sin\beta_{\pi_{i}},$$
(1.72)

где λ_{π_i} , β_{π_i} — эклиптические координаты перигелиев кометных орбит, N — количество перигелиев, входящих в статистику, R — степень концентрации.

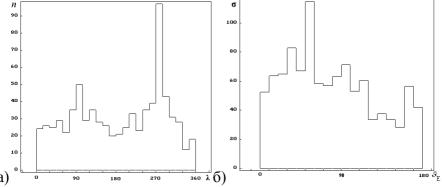


Рис. 1.9. Распределение комет по долготе (а) и плотности широты (б) перигелиев

Результаты вычислений по уравнению (1.72) приведены в табл. 1.10. Данные для полного массива (N=754) комет даны в первой строке: перигелии концентрируются к точке с координатами $\lambda_e = 260^{\circ}.2$, $\beta_e = 57^{\circ}.5$, угловое расстояние которой от апекса (1.70) составляет $\mathcal{G}_{A} = 6^{\circ}.9$.

В табл. 1.10 весь статистический коллектив разделен по ряду признаков (блеск H_{10} , наклон i, эксцентриситет e) на 12 групп. Как видно из таблицы, долгота центра концентрации λ_a лежит в пределах $150^\circ < \lambda_a < 286^\circ$, а широта $\beta_a - +40^\circ < \beta_a < +77^\circ$. Степень концентрации R к найденным точкам у разных групп различна и колеблется от 0,092 до 0,999. Расстояние точки концентрации от апекса (1.70) θ_A лежит в пределах от 7° до 60° .

Таблица 1.10. Концентрация перигелиев к солнечному апексу

Статистический коллектив	N	λ_a	β_a	R	$\mathcal{G}_{\!\scriptscriptstyle A}$
Все кометы	754	260°.2	57°.5	0.160	6°.9
Яркие, <i>H</i> ₁₀ ≤6 ^m	248	275.4	63.2	0.183	10.1
Слабые, $H_{10} > 6^{\text{m}}$	336	193.4	60.1	0.099	40.0
Эллиптические, e<1	226	244.1	55.7	0.137	15.1
Параболические, $e=1$	377	286.4	61.4	0.175	11.8
Гиперболические, $e>1$	151	235.0	39.8	0.186	27.3
Прямые, <i>i</i> ≤90°	339	197.6	76.5	0.116	34.6
Прямые яркие, <i>i</i> ≤90°, <i>H</i> ₁₀ ≤6 ^m	118	261.9	68.7	0.167	15.7
Прямые слабые, <i>i</i> ≤90°, <i>H</i> ₁₀ >6 ^m	159	149.7	56.1	0.131	60.1
Обратные, <i>i</i> >90°	415	267.8	46.1	0.212	7.5
Обратные яркие, $i>90^{\circ}$, $H_{10} \le 6^{\text{m}}$	130	282.4	58.4	0.200	8.5
Обратные слабые, $i>90^{\circ}$, $H_{10}>6^{\mathrm{m}}$	177	238.0	45.2	0.092	22.2
Кометы Крейца	28	282.8	35.2	0.999	20.3

Анализируя полученные данные, можно сделать несколько важных выводов. Так, во второй строке табл. 1.10 даны координаты точки концентрации перигелиев ярких комет (абсолютная звездная величина $H_{10} \le 6^m$), а в третьей строке – слабых $(H_{10} > 6^m)$. Степень концентрации перигелиев ярких

комет (R=0,183) в 1,85 раза выше, чем у слабых. В кометной астрономии слабые кометы принято считать в среднем более старыми, в большей мере подвергшимися дезинтеграции. Очевидно, что орбиты старых комет в большей степени накопили эффекты диффузии. Таким образом, сравнивая данные второй и третьей строки, можно получить качественное представление о направлении эволюции перигелиев. Так, для ярких комет $\lambda_{\epsilon} = 275^{\circ}.4$, у слабых — $\lambda_{\epsilon} = 193^{\circ}.4$, следовательно,

можно предположить, что $\frac{d\lambda}{dt}$ < 0 .

Тесную связь с солнечным апексом имеют яркие ($H_{10} < 6^m$) обратные ($i > 90^\circ$) кометы, о чем свидетельствуют их параметры: $\theta_A = 8^\circ.5$; $\lambda_a = 282^\circ.4$; $\beta_a = 58^\circ.4$; R = 0.200. С другой стороны, в соответствии с законами диффузии Оорта-Штейнса, слабые ($H_{10} > 6^m$), прямые ($i < 90^\circ$) кометы получили наибольшее возмущение, их связь с солнечным апексом ослабла ($\theta_A = 60^\circ$, $\lambda_a = 150^\circ$). Таким образом, данные табл. 1.10 несут в себе информацию для интерпретации эволюционных процессов в кометной системе, но это выходит за пределы настоящей статьи.

В космогоническом аспекте чрезвычайно важен сам факт связи кометных перигелиев с солнечным апексом. Апекс — некая реперная точка для системы долгопериодических комет, поэтому в банк данных кометной системы мы включили величину углового расстояния $\mathcal{G}_{\scriptscriptstyle A}$ перигелия каждой орбиты от солнечного апекса, вычисленную по формуле:

$$\theta_{A} = \arccos \left(\sin \beta_{E} \sin \beta_{\pi} - \cos \beta_{E} \cos \beta_{\pi} \sin \lambda_{\pi} \right). \tag{1.73}$$

В теории столкновительного захвата межзвездной материи (Радзиевский, Томанов, 1973) прогнозируются следующие корреляции:

1. Число комет n, перигелии которых находятся от апекса Солнца на расстоянии не более θ , определяется из формулы

$$n = \frac{N}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \cos \theta} , \qquad (1.74)$$

где N — полное число орбит. Число перигелиев в функции \mathcal{G}_A представлено в табл. 1.11, где n^* — теоретическое число перигелиев (из формулы (1.74)), а n — реальное количество перигелиев, угловое расстояние от апекса Солнца которых содержится в данных пределах. Некоторое сглаживание результатов можно объяснить эффектами диффузии, но общее уменьшение числа перигелиев от апекса Солнца к его антиапексу не вызывает сомнений.

Таблица1.11. Зависимость числа комет, блеска и перигелийного расстояния орбит от расстояния перигелия до апекса Солнца

\mathcal{G}_{A}	n*	n	\overline{q} , a.e.	\overline{H}_{10}
0° - 60°	377	269	0.983±0.066	6. ^m 38±0.18
60° - 90°	156	187	1.329±0.103	6. ^m 84±0.21
90° - 120°	120	162	1.224±0.099	6. ^m 92±0.22
120° - 180°	101	136	1.058±0.075	7. ^m 12±0.24

2. Среднее перигелийное расстояние \overline{q} кометных орбит пропорционально $\sin^2 \theta_{\scriptscriptstyle A}$. Это означает, что \overline{q} должно быть минимально у орбит с перигелиями в направлении апекса $(\theta_{\scriptscriptstyle A} \to 0^\circ)$ и около антиапекса $(\theta_{\scriptscriptstyle A} \to 180^\circ)$.

Справедливость указанной корреляции подтверждают данные табл. 1.11.

3. Абсолютная звездная величина комет \overline{H}_{10} должна возрастать с увеличением \mathcal{G}_A . Справедливость и этой корреляции подтверждают соответствующие данные табл. 1.11.

Подведя итоги вышеизложенному, можно констатировать факт несомненной связи перигелиев кометных орбит с солнечным апексом. Этот феномен является наблюдательной основой концепции межзвездного происхождения комет.

Проверим теперь наличие связи перигелиев с направлением на центр Галактики (1.71). Для этой цели мы создали каталог долгопериодических комет (N=754) в галактических координатах, используя в качестве первоосновы каталог Marsden, Williams (1998). При равномерном распределении

комет по галактической долготе перигелия l_{π} (рис. 1.10a) на каждом интервале должно находиться $\bar{n} = 20.9 \pm 3.9$ комет. Однако на интервалах l_{π} 20°-60°, 120°-140°, 310°-320° число перигелиев в 1.3÷3 раза больше среднего, а около долгот 90°, 180°, 270° и 360° число перигелиев в 1.5÷2 раза меньше То есть наблюдается некоторая симметрия распределении кометных перигелиев относительно направления на центр Галактики. В распределении плотности σ перигелиев в зависимости от углового расстояния \mathcal{G}_G между направлением на центр Галактики (1.71) и на перигелии комет (рис. 1.10б) существует $\theta_c \approx 45^{\circ}$ четкий максимум на расстоянии квадратурах $\theta_{c} = 90^{\circ}$ (при минимум равномерном $\bar{n} = 60.0 \pm 20.4$). Плотность распределении перигелиев несколько уменьшается к направлению на антицентр Галактики $(\theta_{c} \rightarrow 180^{\circ}).$

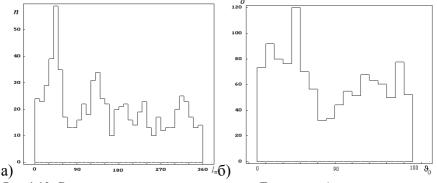


Рис. 1.10. Связь комет с направлением на центр Галактики: а) распределение комет по галактической долготе перигелия; б) распределение плотности σ перигелиев по угловому расстоянию \mathcal{G}_G от направления на центр Галактики

В кометной космогонии было бы чрезвычайно важно определить плоскость, к которой концентрируются кометные перигелии, поскольку именно в этой плоскости может находиться источник комет, например планета X (Радзиевский, 1987). Поиск такой плоскости проводили Гулиев и Дадашов (1985), подсчитывая количество перигелиев в 10-ти градусных

окрестностях плоскостей с заданным наклоном к эклиптике i и долготой восходящего узла на эклиптике Ω . Используя шаг 10° по i и Ω , эти авторы определили плоскость, около которой наибольшее число перигелиев: $\Omega = 100^{\circ}$, $i = 90^{\circ}$.

Мы провели аналогичные расчеты с шагом 1° по i и Ω и нашли, что максимальное число перигелиев располагается в зоне $\pm 10^{\circ}$ около плоскости:

$$\Omega = 95^{\circ}, i = 86^{\circ}.$$

Данная плоскость имеет весьма важное космогоническое значение: именно в этой плоскости находится апекс пекулярного движения Солнца.

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что все статистические закономерности в распределении перигелиев орбит долгопериодических комет свидетельствуют в пользу гипотезы межзвездного происхождения комет.

§ 1.5. Константы Тиссерана долгопериодических комет

В теории межзвездного происхождения комет предполагается, что кометы были захвачены в Солнечную систему в эпоху прохождения Солнца через межзвездное облако, содержащее кометные ядра. Постулируется, что поток кометных ядер шел в Солнечную систему со скоростью V_{∞} из радианта, совпадающего с апексом пекулярного движения Солнца ($L_A = 270^\circ$, $B_A = 53^\circ.5$). Захват комет мог происходить в результате пертурбационного маневра внутри сферы действия планеты (Томанов, 1989). При очень близком прохождении около большой планеты элементы ee орбиты существенно изменяются, поэтому возникает вопрос отождествлении комет с различными системами элементов.

Необходимым условием тождественности двух комет является равенство постоянной Якоби C для различных систем элементов. В литературе это утверждение получило название критерия Тиссерана. Аналитически критерий Тиссерана выражается равенством, вытекающим из интеграла Якоби

$$\frac{\mu}{a_1} + 2\omega\sqrt{\mu a_1(1 - e_1^2)}\cos i_1 = \frac{\mu}{a_2} + 2\omega\sqrt{\mu a_2(1 - e_2^2)}\cos i_2, \quad (1.75)$$

где (применительно к исследуемому нами случаю) a_1, e_1, i_1 — большая полуось, эксцентриситет и наклон орбиты межзвездной кометы до захвата, a_2, e_2, i_2 — соответствующие элементы после захвата, μ — гелиоцентрическая гравитационная постоянная, ω — угловая скорость кругового движения возмущающей планеты.

Большая полуось $a_{\scriptscriptstyle 1}$ выражается из интеграла энергии через $V_{\scriptscriptstyle \infty}$:

$$a_1 = -\frac{\mu}{V_{\pi}^2}. (1.76)$$

Эксцентриситет определяется как обычно:

$$e_{1} = \sqrt{1 + \frac{V_{\infty}^{2} K^{2}}{\mu^{2}}}, \qquad (1.77)$$

где удельный момент количества движения K кометы (Радзиевский, Томанов, 1985)

$$K = \frac{AV_{\infty}}{2}\sin\theta\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\mu}{AV_{\infty}^{2}(1 + \cos\theta)}}\right),\tag{1.78}$$

A — радиус орбиты планеты, а \mathcal{G} — угловое расстояние планеты от солнечного апекса, которое зависит от долготы планеты L и широты апекса (Томанов и др., 1994):

$$\mathcal{G} = \arccos(-\cos B_{A} \sin L). \tag{1.79}$$

Величина i_1 определена в (Томанов, Радзиевский, 1975):

$$i_{1} = \arccos\left(\frac{\cos B_{A} \sin L}{\sin \theta}\right). \tag{1.80}$$

Из третьего закона Кеплера ω выражается через большую полуось A возмущающей планеты

$$\omega = \mu^{\frac{1}{2}} A^{-\frac{3}{2}}. \tag{1.81}$$

Функция (1.75) с учетом (1.81) приобретает вид

$$C_o = \mu \left[\frac{1}{a} + 2\sqrt{\frac{q(1+e)}{A^3}} \cos i \right],$$

где перигелийное расстояние q = a(1-e).

Обычно постоянную Тиссерана C определяют из соотношения

$$C = \frac{C_o}{\mu} = \frac{1}{a} + 2\sqrt{\frac{q(1+e)}{A^3}}\cos i.$$
 (1.82)

При подстановке в (1.82) значений $a_1, e_1, K, \mathcal{G}, i_1$ из (1.76)— (1.80) можно вычислить C в функции долготы планеты L. Ниже мы будем иллюстрировать полученные результаты на примере захвата комет Землей. В табл. 1.12 приведены элементы орбит межзвездных комет, движущихся из апекса Солнца со скоростью $V_{\infty}=4$ км/с (до захвата), а также постоянная Тиссерана C (1.82) в функции L. Из таблицы видно, что наклоны к эклиптике орбит межзвездных комет заключены в пределах от 53.5° до 126.5°, e и q имеют максимумы при $L=90^{\circ}$ и минимумы при $L=270^{\circ}$. Зависимость постоянной Тиссерана C от долготы восходящего узла Ω показана на рис.1.11 сплошной линией. Зависимость $C(\Omega)$ близка к синусоидальной.

Таблица 1.12. Элементы орбит и постоянная Тиссерана межзвездных комет, пересекающих орбиту Земли ($V_{\infty}=4$ км/с, $a_{\perp}=-55.4$)

L	9	$\Omega_{_1}$	i_1	e_1	q _{1,} (a.e.)	$C_{1,}$ (a.e.)-1
0°	90.0°	180°	53.5°	1.010	0.569	1.254
30	107.3	210	57.3	1.013	0.721	1.282
60	121.0	240	69.7	1.015	0.826	0.877
90	126.5	270	90.0	1.016	0.862	-0.018
120	121.0	300	110.3	1.015	0.826	-0.913
150	107.3	330	122.7	1.013	0.721	-1.318
180	90.0	0	126.5	1.010	0.569	-1.290
210	72.7	30	122.7	1.007	0.408	-0.994
240	59.0	60	110.3	1.005	0.285	-0.543
270	53.5	90	90.0	1.004	0.239	-0.018
300	59.0	120	69.7	1.005	0.285	0.507
330	72.7	150	57.3	1.007	0.408	0.958

приведены характеристики образующихся в результате захвата Землей. Результаты получены при $V_{\infty} = 4$ км/с, сферические координаты точки входа кометы на сфере влияния составляют $\varphi = 90^{\circ}$, $\theta = 45^{\circ}$. В табл. 1.13 помимо элементов орбит $(i_2, \Omega_2, \omega_2, a_2, e_2)$, приведено значение параметра p_2 , долгота L_{π} и широта B_{π} перигелия. Расчет велся по методике, изложенной в работе (Томанов и др., 1994). Сравнивая элементы орбит межзвездных комет (табл. 1.12) с элементами орбит после захвата (табл. 1.13) видно, что наклон изменился очень незначительно. Долгота восходящего узла орбит Ω_2 отличается от долготы планеты L во всех случаях 180°. Для практически на других элементов орбит экстремальные значения сохранились около долгот L равных 90° и 270°.

орбит.

В

табл.

1.13

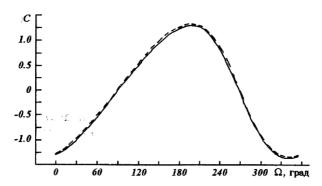


Рис. 1.11. Постоянная Тиссерана комет, двигающихся из апекса Солнца со скоростью 4 км/с, до входа в сферу влияния Земли (сплошная линия) и после выхода из нее (штриховая линия)

последней колонке табл. 1.13 приведено значение постоянной Тиссерана и по этим данным получена зависимость рис. 1.11 (пунктирной изображенная на Небольшое расхождение данной кривой от первой объясняется тем, что последняя строилась для орбит, которые пересекают орбиту планеты. В табл. 1.13 значения С получены для орбит, которые не пересекают тело планеты. Обе кривые практически совпадают.

Таблица 1.13. Элементы орбит и постоянная Тиссерана после захвата комет Землей (V_{∞} = 4 км/с, φ =90°, θ =45°)

L	<i>i</i> 2	$\Omega_{\scriptscriptstyle 2}$	<i>w</i> ₂	p_2 ,	a_{2}	e_2	q_2 ,	L_{π}	B_{π}	C_2 ,
				(a.e.)	(a.e.)		(a.e.)			(a.e.)
0°	53.4°	179.77°	82.26°	1.119	73	0.992	0.562	166.94°	52.65°	1.277
30	57.3	209.96	63.70	1.427	91	0.992	0.716	137.47	49.00	1.300
60	69.8	240.20	49.07	1.642	165	0.995	0.823	111.91	45.15	0.891
90	90.2	270.36	43.11	1.721	558	0.998	0.861	90.51	-43.11	-0.006
120	110.5	300.50	48.72	1.650	902	0.999	0.825	112.26	-44.73	-0.899
150	123.0	330.60	63.18	1.437	252	0.997	0.720	137.70	-48.49	-1.300
180	126.9	0.62	81.79	1.127	126	0.996	0.565	167.12	-52.30	-1.268
210	123.2	30.53	100.72	0.801	86	0.995	0.401	161.44	55.32	-0.968
240	110.8	60.33	115.94	0.553	70	0.996	0.277	126.47	57.21	-0.514
270	90.2	90.08	122.14	0.460	64	0.996	0.230	90.34	57.86	0.012
300	69.5	119.86	116.09	0.551	64	0.996	0.276	125.44	-57.27	0.536
330	57.1	149.73	101.04	0.796	66	0.994	0.399	159.98	-55.48	0.985

Таблица 1.14. Теоретические значения постоянной Тиссерана $(L_{\scriptscriptstyle A}=270^{\circ},~B_{\scriptscriptstyle A}=53^{\circ}.5)$

L	Ω	Мерк.	Венера	Земля	Mapc	Фаэтон	Юпит.	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
180°	0°	-3.222	-1.759	-1.290	-0.866	-0.493	-0.284	-0.171	-0.101	-0.075	-0.063
210	30	-2.468	-1.352	-0.994	-0.670	-0.385	-0.225	-0.138	-0.083	-0.063	-0.054
240	60	-1.332	-0.735	-0.543	-0.369	-0.216	-0.130	-0.083	-0.054	-0.043	-0.038
270	90	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018
300	120	1.296	0.699	0.507	0.333	0.180	0.094	0.047	0.018	0.007	0.002
330	150	2.432	1.316	0.958	0.634	0.349	0.189	0.102	0.047	0.027	0.018
0	180	3.186	1.723				0.248	0.135	0.065	0.039	0.027
30	210	3.270					0.250	0.135	0.064	0.037	0.026
				0.877			0.165		0.036		0.011
			-0.018				-0.018	0.000	0.000		-0.018
						-0.348			-0.072		-0.047
150	330	-3.306	-1.801	-1.318	-0.883	-0.500	-0.287	-0.171	-0.100	-0.073	-0.062

В табл. 1.14 приведены значения C_1 в функции Ω для всех планет, включая Фаэтон (A=2.8 a.e.). У комет, захваченных Меркурием, -3.306 < C<+3.270. У других комет значения C по модулю тем меньше, чем дальше от Солнца расположена «родительская» планета. У всех комет, захваченных в процессе

движения планеты на долготах L от 90° до 270° , значения постоянной Тиссерана должны быть отрицательными.

Данные табл. 1.14 иллюстрируются на рис. 1.12, где расчет C проводился с шагом в 1° по долготе планеты L.

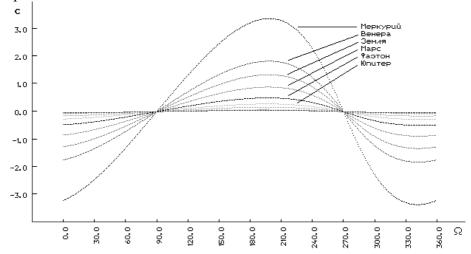


Рис. 1.12. Постоянная Тиссерана для всех планет до входа в сферу влияния из апекса ($L_{\scriptscriptstyle A}=270^{\circ},\quad B_{\scriptscriptstyle A}=53^{\circ}.5$)

Перейдем теперь к сравнению полученных результатов с данными наблюдений. Как и в работе (Радзиевский, 1990), для статистики будем использовать исключительно почти параболические кометы (период обращения P > 200 лет), взяв за основу каталог (Marsden, Williams, 1992). Таких комет в указанном каталоге содержится 671.

современных космогонических концепциях предполагается, что кометы своим происхождением обязаны планетам: извержение из сферы влияния планеты, захват межзвездных комет в результате пертурбационного маневра в гравитационном поле планеты и др. «Родительской» планетой может быть любая из планет Солнечной системы (Томанов, образом, Тиссерана 1989). Таким константы рассчитываться ПО отношению соответствующей К «родительской» планете.

Для корректного решения вопроса о константах Тиссерана долгопериодических комет прежде всего целесообразно данный комплекс комет дифференцировать на планетные семейства по типу планетных семейств короткопериодических комет. Первоначальное предположение о генетической связи с планетой можно выносить лишь в том случае, если орбита кометы проходит в непосредственной близости от орбиты соответствующей планеты. Полагая орбиты планет круговыми радиуса A, мы вычислили минимальное расстояние r орбиты каждой кометы от орбит всех девяти больших планет и Фаэтона по формуле:

$$r = \left(A^2 + \left[\frac{q(1+e)}{1+e\cos\upsilon}\right] - 2A\frac{q(1+e)}{1+e\cos\upsilon}\sqrt{1-\sin^2i\times\sin^2(\omega-\upsilon)}\right), (1.83)$$

где q, e, i, ω — элементы кометной орбиты, υ — истинная аномалия, задаваемая при расчетах с шагом в 1°.

Таблица 1.15. Минимальное расстояние от планетных орбит некоторых комет – типичных представителей планетных семейств

Комета	Мер- курий	Вене- ра	Земля	Mapc	Фаэ- тон	Юпи- тер	Сатурн	Уран	Неп- тун	Роди- тельская планета	С	R
1978 XV	0.006	0.322	0.595	0.732	0.646	0.281	0.846	3.710	7.548	Мерк.	2.70	0.39
1967 II	0.070	0.003	0.007	0.071	0.250	0.600	1.270	2.709	4.638	Венера	2.94	0.71
1983 VII	0.611	0.278	0.005	0.518	1.790	3.232	3.755	3.910	3.236	Земля	0.82	1.003
1989 XXI	0.780	0.560	0.372	0.004	0.220	0.901	3.208	8.854	15.513	Mapc	1.08	1.52
1973 II	1.775	1.453	1.189	0.692	0.506	2.690	3.048	2.747	1.726	Фаэтон	-0.70	2.26
1975 VIII	2.776	2.596	2.461	2.213	1.533	0.028	1.412	7.591	15.017	Юпит.	0.26	5.24
1945 I	2.039	1.721	1.464	1.004	0.182	0.687	0.061	1.760	4.038	Сатурн	0.15	9.88
1972 IX	4.046	3.832	3.647	3.277	2.299	0.283	3.614	0.280	5.538	Уран	0.01	19.16
1973 IX	3.535	3.261	3.031	2.585	1.456	0.762	4.892	3.562	0.370	Нептун	-0.01	31.00

В табл. 1.15 приводится фрагмент результатов расчета по формуле (1.83). При сепарации комет на планетные семейства, например, комету 1983 VII можно занести только в семейство Земли: комета прошла на расстоянии r=0.005 а.е. от орбиты

Земли. Вряд ли комета 1983 VII могла быть динамически связана с другими планетами, ее расстояние, к примеру, от Юпитера не было меньше 3.2 а.е.

Итак, по значению минимального расстояния кометных орбит от орбит планет (1.83) мы разделили кометы на планетные семейства. Число комет в каждом семействе n_1 приведено в табл. 1.16. Наиболее многочисленным (150 комет) оказалось семейство Земли. Семейство Юпитера составляют только 53 кометы, ни одна из комет не проходила в непосредственной близости от орбиты Плутона - n_1 =0. При формировании планетных семейств исключены кометы с $q \le 0.01$ а.е., поэтому всего в табл. 1.16 содержится 647 комет.

Таблица 1.16. Распределение комет по планетным семействам

	n_1		Зона ра	бочего		
Планета		C	уз.	па	n_2	C
			R_1 (a.e.)	R_2 (a.e.)		
Меркурий	89	-6.815+7.826	0.305	0.469	35	-6.815+6.663
Венера	102	-3.855+4.099	0.707	0.740	15	-3.016+3.756
Земля	150	-2.855+2.821	0.967	1.033	31	-2.688+2.821
Mapc	139	-1.990+1.694	1.369	1.678	66	-1.794+1.694
Фаэтон	99	-0.893+0.869	2.300	3.300	73	-0.893+0.753
Юпитер	53	-0.480+0.434	4.362	6.044	37	-0.408+0.420
Сатурн	10	-0.224+0.145	8.286	10.792	6	-0.083+0.145
Уран	2		17.500	20.864	2	
Нептун	3		28.502	31.613	2	
Плутон	0		28.961	49.919	0	
Всего	647				267	

После сепарации комет на планетные семейства подсчитаны по формуле (1.83) постоянные Тиссерана. Для отдельных семейств максимальные значения постоянной Тиссерана получились меньше чем $C_{\rm max}$, использованные в работе (Радзиевский, 1990). Например, для Земли ее значение $C_{\rm max} = +2.821$, для Юпитера $C_{\rm max} = +0.434$. Подчеркнем, что В.В. Радзиевский приводит значения соответственно +5.244 и +2.255.

Распределение комет (n=647) по значению C приведено на рис. 1.13, из которого видно, что существует хорошо выраженный максимум около C=0 и резкий спад к значениям |C| = 3. Комет, у которых |C| > 3, оказалось всего 76, что составляет менее 12 % от общего числа комет.

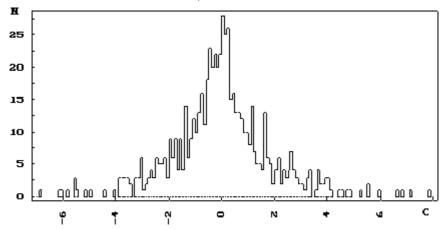


Рис. 1.13. Распределение комет из каталога Marsden, Williams (1992) по значению постоянной Тиссерана (q>0.01)

Известно, что возраст долгопериодических комет составляет миллионы лет. За столь длительный интервал времени пребывания комет в Солнечной системе их орбиты подверглись существенным возмущениям. Видимо, вследствие диффузии плоскости орбит комет с большими C приблизились к плоскости эклиптики. Среди указанных 76 комет вообще отсутствуют орбиты с наклоном $66^{\circ} < i < 112^{\circ}$. Возраст комет с большими C мог быть несколько выше. Среднее значение абсолютной звездной величины \overline{H}_{10} комет с |C| < 3 равен $6^{\mathrm{m}}.36$, кометы с |C| > 3 имеют $\overline{H}_{10} = 6^{\mathrm{m}}.47$. Хотя разница в блеске $\Delta \overline{H}_{10} = 0^{\mathrm{m}}.11$ незначительна, тем не менее можно предполагать, что последние кометы несколько старше, они постепенно утрачивали связь с «родительской» планетой. Наложим более строгое условие генетической связи кометы с «родительской» планетой.

Критерий разделения комет на планетные семейства с использованием формулы (1.83), по-видимому, не является формальным. В любых гипотезах, связывающих происхождение комет с планетами, местом «рождения» кометы должен быть один из узлов ее гелиоцентрической орбиты, расположенный около орбиты «родительской» планеты. Для кометы 1983 VII гелиоцентрическое расстояние восходящего узла на эклиптике составляет R=1.003 а.е. Таким образом, данная комета, видимо, действительно вышла на современную гелиоцентрическую орбиту из сферы влияния Земли.

Итак, величина гелиоцентрического расстояния одного из узлов (назовем его «рабочим») может быть вторым критерием для определения кометных семейств. В последней колонке табл. 1.16 приведено гелиоцентрическое расстояние R рабочего узла (либо восходящий, либо нисходящий). Как видно из табл. 1.16, рабочий узел практически лежит на орбите «родительской» планеты. С учетом радиуса ρ сферы влияния планеты и эксцентриситета e планетной орбиты зона, в которой должен располагаться рабочий узел, определяется соотношением

$$A(1-e) - \rho < R_{N} < A(1+e) + \rho$$
, (1.84)

где R_{N} – гелиоцентрическое расстояние рабочего узла,

$$\rho = 1.15A_{\downarrow}^3 \sqrt{\frac{m}{M}} ,$$

(m, M) – массы планеты и Солнца).

В соответствии с (1.84) ширина зоны рабочего узла приводится в табл. 1.16, где R_1 – расстояние в а.е. от Солнца до нижней границы рабочей зоны, R_2 – расстояние до верхней границы. Для Фаэтона принято $R_N=2.8\pm0.5$ а.е. В таблице приведено число n_2 комет, вошедших в каждое семейство с учетом двух вышеописанных критериев, т.е. с использованием формул (1.83) и (1.84). Критерий (1.84) является, по-видимому, очень жестким, с его использованием мы получаем довольно ограниченный статистический коллектив — 267 комет. Семейство Земли, например, уменьшилось со 150 до 31 кометы. Но существенно, что интервалы теоретических значений C

уменьшились (ср. колонки 3 и 7 в табл. 1.16). При этом число комет с |C| > 3 составило уже только 9%.

Наконец, можно указать еще одну причину, вследствие теоретические значения CΜΟΓΥΤ полностью соответствовать C для реальных комет. Как известно, вектор скорости Солнца меняет направление, например, при колебаниях Солнца относительно галактической плоскости. Вследствие этого широта солнечного апекса $B_{\rm A}$ в эпоху захвата некоторой части комет могла быть меньше широты стандартного апекса. Если положить $B_A=25^{\circ}$, то теоретические значения C возрастают (табл. 1.17) и становятся вполне соизмеримыми с фактическими значениями C наблюдавшихся комет (рис. 1.13). Заметим, что необходимую широту апекса может соответствующее скоростей Солнца сложение потока межзвездных комет.

Резюмируя вышеизложенное, можно считать, что константы Тиссерана долгопериодических комет не превышают теоретические значения \overline{C} , вычисленные исходя из теории захвата комет.

Приведем еще два дополнительных аргумента в пользу гипотезы межзвездного происхождения комет. Как видно из рис.1.12, зависимость C от долготы восходящего узла должна иметь синусоидальный характер. Этот теоретический прогноз, вытекающий из теории захвата, подтверждается наблюдениями. На рис. 1.14 сплошной линией изображена зависимость $C(\Omega)$, прерывистая линия — зависимость $C(\Omega)$ для комет семейства Земли. Для построения точек на последней подсчитывались средние значения \overline{C} для комет с восходящими узлами на интервалах эклиптики шириной 90° с шагом 30°. Некоторый статистической кривой СЛВИГ теоретической, возможно, отражает какие-то пертурбационные процессы в кометной системе.

Распределение долгопериодических комет по C изучалось в работе Терентьевой (1986а), где отмечено наличие максимума в распределении комет по C около нуля. Наши результаты (рис. 1.13) подтверждают выводы, сделанные в статье

(Терентьева, 1986а). В работе (Терентьева, 1986б) отмечено, что «явление "зеркальной симметрии" в *С*-распределении малых тел требует специального исследования и его необходимо объяснить в рамках той или иной принимаемой гипотезы о происхождении малых тел».

Таблица 1.17. Теоретические значения постоянной Тиссерана для всех планет до входа в сферу влияния планеты ($L_{\!\scriptscriptstyle A}=270^{\circ}$, $B_{\!\scriptscriptstyle A}=25^{\circ}$)

L	Ω	Мерк.	Венера	Земля	Mapc	Фаэтон	Юпит.	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
180°	0°	-4.900	-2.671	-1.956	-1.310	-0.742	-0.424	-0.252	-0.144	-0.104	-0.087
210	30	-3.556	-1.947	-1.430	-0.962	-0.550	-0.319	-0.193	-0.114	-0.085	-0.072
240	60	-1.871	-1.030	-0.760	-0.515	-0.299	-0.178	-0.112	-0.070	-0.054	-0.047
270			-0.018						-0.018		-0.018
300		1.835			0.479	0.263	0.142		0.034		0.011
330		3.520			0.926	0.514	0.283	0.157	0.078		0.036
0		4.864			1.274	0.706	0.388		0.108		0.051
		5.638			1.463	0.806	0.439		0.119		0.055
		5.129			1.315	0.717	0.385		0.098		0.042
					-0.018		-0.018		-0.018		-0.018
			-2.792		-1.351		-0.421	-0.244			-0.078
1	330	-5.674	-3.079	-2.249	-1.499	-0.842	-0.475	-0.278	-0.155	-0.110	-0.091
C 1.250	Ļ					. com			-9		
						A Property Control		10			
1.000					/						
0.750					Jan			\	*		
0.500	'				/	خىم	4	À			
0.250	·			/				\ \			
0.000	·	<u> </u>				/-			1		<i>></i> 0
-0.250	·			\bigvee	/	/			N.	0	
-0.500			/	´\					À		
-0.750	-				<i></i>				N.		
-1. 000	+	1		=					/	\	
-1. 250	+	and the same								1	
		-				-			-		. Ω
		9.	30.0	90.0	120.0	150.0	210.0	240.0	270.0	330.0	360.0 S

Рис. 1.14. Теоретическая (при $V_{_\infty}$ =4км/ч, на выходе из сферы влияния) и наблюдаемая зависимости $C(\Omega)$ для Земли

С-распределении (рис. Максимум 1.13) В может интерпретироваться рамках теории межзвездного следующим образом. Вследствие происхождения комет гравитационной фокусировки плотность потока межзвездных комет на эклиптику около 90° и 270° максимальна (Радзиевский, 1990), следовательно, именно около этих долгот захват наиболее эффективен. Этот факт подтверждается тем, что около долгот 90° и 270° имеется повышенная концентрация узлов кометных орбит (Томанов, Радзиевский, 1975). Напомним, что долгота восходящего узла отличается от долготы планеты на 180°. Кометы, захваченные около указанных долгот, должны иметь наклон $i \rightarrow 90^{\circ}$ (табл. 1.12, 1.13). Следовательно, для этих комет $\cos i \rightarrow 0$, a соответственно $C \rightarrow 0$.

§ 1.6. Эруптивная гипотеза

Гипотеза о выбросе комет с поверхности планет была исторически первой научной космогонической гипотезой. Lagrange (1812) высказал мысль о том, что частичные или полные взрывы удаленных от Солнца планет могли порождать кометы. Лагранж нашел, что некоторые из обломков могли получить параболические скорости, другие — эллиптические. При этом для выброса будущей кометы на параболическую орбиту необходима скорость $(\sqrt{2}-1)V_{nz} < V < (\sqrt{2}+1)V_{nz}$, где V_{nz} — круговая скорость планеты. Математическая сторона гипотезы Лагранжа выполнена изящно, но, по заявлению Schiaparelli (1871), «первые приложения этой гипотезы Ольберсом к объяснению происхождения комет встретили холодный прием у астрономов. И ни один факт в дальнейшем не подтвердил ее».

Всехсвятский (1967), начиная с 30-х годов, развивал гипотезу Лагранжа, предполагая вначале, что кометы являются продуктом вулканической деятельности Юпитера, а в 60-х годах он считал, что источником короткопериодических комет могли быть спутники планет-гигантов. Дробышевский (1984) предложил механизм выброса фрагментов ледяной коры спутников планет-гигантов вследствие взрыва гремучего газа, образующегося в результате электролиза электрическим током,

обусловленного взаимодействием спутника с магнитосферой планеты.

Многие авторы критически рассматривали гипотезу о происхождении комет путем взрывов или извержений на планетах и спутниках и приходили к выводу о ее несостоятельности. Приведем некоторые доводы, высказывавшиеся против этой гипотезы.

Впервые Gauβ (1813) отметил, что линия узлов кометной орбиты должна совпадать с линией апсид и одновременно лежать в плоскости орбиты кометы, чего в действительности не наблюдается.

Tisserand (1896) показал, что в результате выброса вектор скорости должен образовать с радиусом-вектором угол, близкий к 35°16′, и заключил, что "эти весьма ограничительные условия делают совершенно невероятной рассматриваемую гипотезу".

Согласно гипотезе извержения, кометные орбиты должны начинаться на поверхности планет или спутников. Однако тщательные исследования короткопериодических комет на предмет нулевых сближений с планетами и спутниками дали отрицательный результат – Fayet (1886), Corlin (1938), Kamienski (1954), Маковер (1967), Tancredi и Rickman (1992). Кресак (1983) указал на отсутствие вообще какой-либо динамической связи со спутниками Урана трех комет и заключил: «...сомнительно, обоснованно ли вообще называть их "семейством Урана"». показал, кометы предполагаемого Томанов (1983a) что семейства Сатурна, всего 10 объектов, не имели динамической связи с Сатурном. Отсутствие генетической связи комет с Ураном показано в статье Томанова (1983б).

Радзиевский (1979) рассмотрел условия выброса с Юпитера, определил скорость V продуктов извержения на границе атмосферы Юпитера в функции элементов кометной орбиты. Показано, что для получения теоретических кометных орбит, адекватных наблюдаемым, необходимо ограничить скорость извержения на Юпитере величиной 60.45 км/с и считать «работающий» диапазон скоростей шириной всего лишь в $0.25 \, \text{км/c}$.

В работе Николаевой и Томанова (1987) в рамках задачи трех тел изучены условия выброса на гелиоцентрическую орбиту с любого спутника планет Солнечной системы. Получена формула, определяющая необходимую начальную скорость V на спутнике для старта на гелиоцентрическую орбиту с большой полуосью a, эксцентриситетом e, перигелийным расстоянием q, наклоном i. Вычислены значения V для всех реальных комет, которые обычно относят к семействам Сатурна, Урана, Нептуна. Оказалось, что необходимые скорости выброса в 2-3 раза больше тех теоретических значений скоростей, которые принимал Всехсвятский (1967).

Важнейшим критерием, определяющим правдоподобность космогонической гипотезы, является соответствие наблюдаемых теоретических (каталожных) И элементов кометных орбит. Теоретические элементы кометных орбит формулам Всехсвятского (1967)ПО вычислены (1984, 1987), Томанова Николаевой И где использованием критериев согласия Пирсона и Колмогорова, что теоретические орбиты не согласуются с орбитами реальных комет

статье Томанова (1991) выполнена статистическая проверка эруптивной гипотезы на предмет извержения почти параболических Проведен комет. анализ распределения гелиоцентрических расстояний полюсов, наклонов, орбит кометных «кометных близнецов». Факторов, подтверждающих гипотезу извержения, не обнаружено.

работе Томанова (1983B)приводится сравнение основных следствий, вытекающих ИЗ гипотез обсуждаются извержения комет, В сравнительном характеристики кометной некоторые системы: блеск. химический состав комет, кометные семейства и др. Сделан эруптивной несоответствии гипотезы кометной закономерностям Получены системе. аргументы в пользу гипотезы захвата комет.

§ 1.7. Гипотеза Оорта

В современной планетной космогонии считается, что на определенном этапе эволюции Солнечной системы около протосолнца формируется дискообразная газопылевая туманность. При столкновении протопланетная входящих в состав туманности, идет процесс аккумуляции с образованием крупных тел, называемых планетезималями. Планетезимали строительный материал, ИЗ формируются планеты. Достигнув некоторой предельной массы, планета выбрасывает сближающиеся с ней тела на орбиты с эксцентриситетами. Предположение большими выбросе реликтовых планетезималей за пределы Солнечной системы Oort (1950, 1951) положил в основу гипотезы о происхождении комет. Предполагается, что кометы образовались вместе с планетами в едином процессе и были выброшены возмущениями Юпитера на окраину Солнечной системы. Около 5% из общего числа выброшенных тел под действием ближайших к Солнцу звезд остались двигаться вокруг Солнца на больших расстояниях и составили так называемое облако комет. Под действием повторных возмущений звезд некоторые из этих тел опять залетают внутрь планетной системы и, приближаясь к Солнцу, наблюдаются в виде комет. Астрофизический аспект гипотезы о реликтовой природе комет рассматривал Сатегоп (1963), считавший, что ядра комет формируются на ранней стадии эволюции Солнечной системы из первичного протозвездного газопылевого облака. Эту гипотезу развивали Hills (1973) и Шульман (1983).

Количественное рассмотрение процесса выброса тел проводили Oort (1950, 1951), Сафронов (1969), Fernandez, Ip (1983). Механизм выброса тел гравитационными возмущениями связан с перераспределением момента количества движения. Наибольшие скорости относительно Солнца имели тела со случайными скоростями, направленными вдоль круговой орбиты в сторону вращения газопылевого диска. При сближении тела планетой вектор его относительной скорости поворачивается без изменения величины. Абсолютная скорость

увеличивается, если этот поворот происходит в направлении орбитального движения планеты. При этом возрастает момент количества движения тела относительно Солнца за счёт орбитального момента планеты. Итак, планетезимали выбрасываются преимущественно в направлении движения планеты

Гипотетический рой комет на гелиоцентрических расстояниях около 150 000 а.е. в литературе именуют облаком Оорта. Физический механизм образования этого облака не рассматривал ни Оорт, ни его последователи. Главная трудность, видимо, заключается в том, чтобы теоретически обосновать торможение кометных тел, прибывающих сюда из Юпитера, и перевести их на круговые орбиты. Принципиальная трудность решения данной проблемы усугубляется двумя факторами: 1. Выбрасываемые кометные тела должны уходить из зоны Юпитера в плоскости, близкой к эклиптике. При этом условии изначально облако Оорта должно иметь плоскую Согласно Оорту, облако имеет изотропное распределение орбитальных плоскостей. 2. Выброс Юпитером реликтовых кометных тел МОГ происходить направлении движения планеты, т.е. изначально кометные орбиты должны иметь наклоны к эклиптике $i \approx 0^{\circ}$. Однако в реальной кометной системе наклоны равновероятны, более того, преобладают кометы с обратными движениями ($i > 90^{\circ}$).

Гипотеза о кометном облаке возникла следующим образом. Из нескольких сотен почти параболических комет Оорт отобрал 20 первоначальных орбит, у которых обратные значения большой полуоси 1/a < 0.00075 (а.е.) Для этих комет на кривой распределения 1/a максимум лежит в интервале 0<1/a<0.00005 (а.е.) 7, где оказалось 10 комет, т.е. 50% от всего статистического материала. Для адекватного изложения истории создания гипотезы о кометном облаке, процитируем Oort (1950): «Кривая распределения 1/a имеет крутой максимум на очень малых значениях. Среднее значение 1/a для 10 орбит в первом интервале равно 0.000018, что соответствует большой полуоси $110\,000$ а.е. Можем сделать вывод о том, что существенная

фракция долгопериодических комет должно быть прибыла из областей пространства, расположенных от 2a=20000 до $150\,000$ а.е., т.е. вблизи звезд». Наличие высокого максимума в распределении 1/a при малых значениях — единственный аргумент в космогонической концепции Оорта, на основании которого высказана гипотеза кометного облака.

Lyttleton (1968) указал на принципиальную ошибку при определении максимума в распределении 1/а: систематические ошибки в определении 1/а сравнимы с этой величиной. Литтлтон считает, что для доказательства существования облака показать наличие максимума афелиев определённом расстоянии от Солнца. Гулиев и Дадашов (1985) считают, что недопустимо делить ось 1/а на равные отрезки и подсчитывать число комет на каждом из них. В этом случае даже при равномерном распределении 1/а максимальное число комет обязательно придётся на отрезок вблизи $1/a \to 0$. Эти авторы считают, что для корректного решения проблемы необходимо рассматривать объёмную плотность Fernandez (1985) показал, что 1/a=0 обеспечивает Нептун. Согласно Потапову и Сухоплюевой (1989), максимум при 1/а=0 можно обеспечить действием галактических сил.

Для статистической проверки следствий, вытекающих из будем использовать реликтовой гипотезы, 678 параболических комет (ППК, период Р>200 лет) с перигелийным расстоянием q > 0.4 а.е. из каталога Marsden, Williams (2003). В числе этих комет содержатся: а) долгопериодические кометы (ДПК, P>200 лет, эксцентриситет e<1, большая полуось a>0, N=220), б) параболические кометы (ПК, e=1, $a=\infty$, N=286), гиперболические кометы (ГК, 1 < e < 1.06, a < 0, N = 172). Для всех этих комет мы вычислили первоначальные орбиты, для чего выполнено численное интегрирование уравнений движения комет на 1000 лет назад. Вычисления проведены с применением интегратора Эверхарта и планетной эфемериды DE406. В итоге получен каталог первоначальных орбит, содержащий а) ДПК, N=623, б) ГК, N=55. Отметим, что в комплексе ППК преобладают параболы (e=1) и гиперболы (e>1). В результате

численного интегрирования все параболы трансформировались в эллипсы с эксцентриситетом, очень близким к 1. Аналогично из 172 гипербол преобразованы в эллипсы 117, или 68% от полного их числа.

Для построения кривой 1/a мы использовали более обширный материал. На рис. 1.15 представлено распределение первоначальных ПО 1/a473 орбит на -0.0008 < 1/a < +0.00009 $(a.e.)^{-1}$. Максимум распределения действительно находится на интервале 0<1/a<0.00005 (a.e.)⁻¹, но его величина существенно уменьшилась. Здесь находится 91 комета, или только 19% от всего статистического материала. Среднее значение 1/a для 91 орбиты равно 0.000029 (a.e.)⁻¹, что соответствует большой полуоси a = 65300 a.e. A это значит, что, следуя Оорту, гипотетическое кометное облако надо поместить ближе к Солнцу. Таким образом, гипотеза кометного облака радикально зависит от статистического материала, на базе которого она построена.

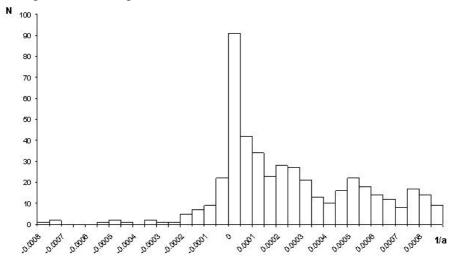


Рис.1.15. Распределение кометных орбит по величине обратной большой полуоси

Наблюдаемое распределение ППК по *1/а* объяснятся в рамках теории захвата комет. В работах Радзиевского, Томанова

(1977а, 1977б) показано, что гравитационный захват Юпитером межзвездных комет, прибывающих в Солнечную систему из апекса Солнца, возможен при условии, что скорость комет в бесконечности V_{∞} <10 км/с, а их эксцентриситет eнезначительно превышает 1. На выходе из сферы действия планеты образуются эллиптические орбиты с эксцентриситетом, близким к 1. Таким образом, эксцентриситеты теоретических орбит должны группироваться к 1 и иметь резкий обрыв функции распределения по e при e>1. Именно таков характер распределения по эксцентриситетам имеют реальные ППК рис. 1.16. Очень высокий максимум (N=400) находится в интервале 0.999 < e < 1.000. Очевидно, что орбиты с $e \rightarrow 1$ имеют малые значения обратной большой полуоси $1/a = (1-e)/q \rightarrow 0$. возможная причина образования Такова. наш взгляд, максимума на кривой 1/a. При компьютерном высокого моделировании захвата межзвездных комет в работе Томанова, Кузьмина, Аксеновского (1994) получено хорошее согласие каталожных данных с теоретическими значениями е, 1/а.

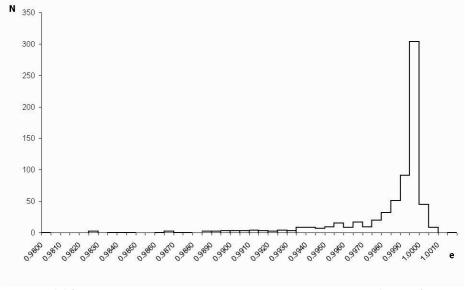


Рис. 1.16. Распределение по эксцентриситету первоначальных орбит ППК

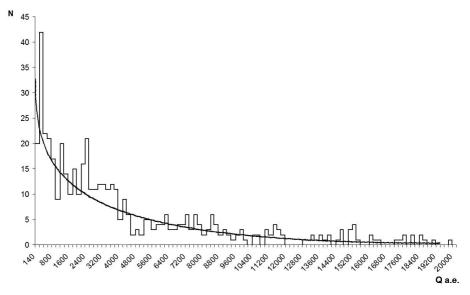


Рис. 1.17. Распределение кометных орбит по величине афелийного расстояния

Таблица 1.18. Объемная плотность афелиев орбит ППК

ΔQ a.e.	N	σ (a.e.) ⁻³
143-1000	122	$2.9 \cdot 10^{-8}$
1000-5000	220	$4.2 \cdot 10^{-10}$
5000-10000	90	$2.5 \cdot 10^{-11}$
10000-20000	56	$1.9 \cdot 10^{-12}$
20000-100000	108	$2.6 \cdot 10^{-14}$
100000-200000	23	$7.8 \cdot 10^{-16}$
>200000	4	

В соответствии с идеологией гипотезы Оорта, кометные афелии должны преимущественно располагаться в кометном облаке. Следовательно, необходимо рассмотреть распределение афелийных расстояний кометных орбит Q. Всего эллиптических орбит N=623. Минимальное афелийное расстояние Q=143 а.е. имеет комета C/1998 K5. 488 комет имеют афелийные расстояния Q<20000 а.е., их распределение по Q дано на

рис. 1.17. В интервале 143 а.е.< Q < 1000 а.е. находится N = 122объемная плотность афелиев здесь $\rho = 2.9 \cdot 10^{-8}$ (a.e.)⁻³ – табл. 1.18. В интервале 1000 а.е. – 5000 а.е. плотность уменьшается почти на два порядка. На интервале $10\ 000\ \text{a.e.} < Q < 20\ 000\ \text{a.e.}$ содержится N = 56 ρ =1.9·10⁻¹² (а.е.)⁻³. Итак, система кометных афелиев начинается с гелиоцентрических расстояний Q=143 а.е. Максимум кометных афелиев находится на расстояниях Q=150-200 а.е. Далее объемная плотность афелиев ρ падает по экспоненте, на расстояниях Q>20~000а.е. плотность $\rho\to 0$. Напомним, согласно гипотезе Оорта, наивысшая концентрация кометных афелиев прогнозируется В гипотетическом кометном расположенном на гелиоцентрических расстояниях 150 000 а.е. Реальная кометная 100 000 a.e. ДО расположена гораздо ближе к Солнцу – рис. 1.17. Лишь только 27 комет (табл. 1.18) могли иметь афелийные расстояния Q>100 000 a.e.

Для косвенного подтверждения существования облака Оорт разделил кометы по величине 1/a на «новые» и «старые». Однако, согласно Kresak (1975), это деление не подтверждается физическими исследованиями: и те и другие показывают огромное разнообразие в строении ядер, химизме, хвостах и т.д. Сравнение спектров «молодых» и «старых» комет произведено поэтому Оортом ДЛЯ комет И не представляется убедительным. В работе Гулиева и Дадашова (1985) показано, что среднее значение абсолютной звёздной величины H_{10} «новых» практически равно H_{10} для «старых» комет. Сделан вывод о необоснованности дифференциации комет на новые и старые.

Во многих работах рассматривается эволюция облака Оорта и, как правило, делается вывод о полном или частичном разрушении облака за космогонически короткое (1954,1969) отметил произвольность искусственность функции распределения скоростей комет в облаке, показал, что звёздные возмущения должны приводить к количестве появлению гиперболических В значительном

скоростей у комет, направляющихся к Солнцу. Отсутствие таковых ставит под сомнение либо роль звёздных возмущений, либо факт существования кометного облака. Всехсвятский пришёл к выводу, что кометы облака должны быть выброшены в межзвёздное пространство. Результаты Всехсвятского подтвердил Weissman (1980).

Чепурова и Шершкина (1989) исследовали влияние на облако Оорта галактического гравитационного поля, а также близких прохождений звезды облака ИЛИ молекулярного водорода и показали, что внешняя часть облака должна покинуть Солнечную систему. Сделан вывод о том, что облако являться долговременным источником долгопериодических комет в Солнечной системе. Мазеева (2004) показала, что наиболее многочисленный приток в планетную область и выброс за пределы облака Оорта происходит, если Солнечная система проходит через гигантское молекулярное облако, состоящее из нескольких массивных конденсаций.

Из расчётов по численному моделированию Bailey (1986) получил, что большинство комет облака будет выброшено из Солнечной системы, а выживет только меньшинство. Антонов и Тодрия (1987) оценили влияние иррегулярных сил Галактики на движение долгопериодических комет: кумулятивный эффект возмущает орбиты комет гораздо сильнее, чем одиночные звёзды и межзвёздные облака.

Исследовав разрушение облака кумулятивным эффектом (Bailey, 1986) и приливными силами со стороны молекулярных облаков (Van den Bergh, 1982), авторы делают однозначный вывод: кометного облака в настоящее время нет. Fellgett (1977) в письме в редакцию выражает резкий протест против использования термина «облако Оорта», так как его существование не доказано.

Hills (1981) полагает, что кометы сформировались во внешних частях коллапсирующего протосолнца, которое имело радиус менее, чем $5\cdot 10^3$ а.е. На этой основе возникает гипотеза об ещё одном кометном облаке, расположенном около внутреннего края облака Оорта. Этот кометный рой стали

именовать облаком Хиллса. По мнению Хиллса, общее число комет, которое вошло в Солнечную систему из этого облака на порядок больше, чем число комет, которое пришло из облака Оорта.

Видоизменённый вариант гипотезы 0 происхождении комет предложен публикациях: Цицин, В Чепурова, Расторгуев (1984, 1985); Чепурова, Расторгуев, Цицин Цицин (1993,1999, 2000). Суммируя результаты данных публикаций, можно видеть, что они сводятся к декларированию следующих постулатов: 1. Кометы суть реликтовые пылевые сгустки – планетезимали. 2. Планетезимали сохранились до настоящей эпохи в поясах между планетами гигантами и за Нептуном. 3. Около орбит планет-гигантов существуют «пустые» туннели – тороидальные области с радиусом около 1 а.е., в которых планетезимали отсутствуют. 4. Межпланетные источники пояса современных короткопериодических комет. 5. Занептунный пояс – источник комет. 6. Планеты-гиганты долгопериодических планетезимали «в Галактику». 7. Почти параболические кометы - планетезимали, возвратившиеся из Галактики в зону планетгигантов.

Основополагающий постулат о тождественности планетезималей и кометных ядер, по нашему мнению, является ошибочным. Произведена молчаливая подмена понятий — без физико-химического обоснования планетезималь названа расплывчатым термином «кометное тело». Не обсуждается сложная астрофизическая проблема коагуляции ледяного кометного ядра. Авторы гипотезы должны были бы ответить на вопрос: как из пылевого сгустка сделать ледяное кометное ядро.

Для статистической проверки модернизированной гипотезы о реликтовом происхождении комет используем 947 комет из каталога Marsden, Williams (2003), в том числе: а) короткопериодические кометы (КПК, период P<200 лет, N=193); б) долгопериодические кометы (ДПК, P>200, эксцентриситет e<1, большая полуось a>0, N=226); г) гиперболические кометы (ГК, e>1, a<0, N=151).

Таблица 1.19. Узлы кометных орбит в зонах планет-гигантов

Зона на	R,	КПК		ДПК		ПК		ГК	
эклиптике	a.e.	N	σ, (a.e.) ⁻²	N	σ, (a.e.) ⁻²	N	σ, (a.e.) ⁻²	N	σ, (a.e.) ⁻²
Туннель Юпитера	4-6	119	1.89	42	0.67	27	0.43	28	0.45
Пояс Юпитер- Сатурн	6-8	16	0.18	21	0.24	15	0.17	16	0.18
Туннель Сатурна	8- 11	16	0.09	19	0.11	19	0.11	12	0.07
Пояс Сатурн- Уран	11- 18	10	0.016	23	0.036	28	0.044	18	0.028
Туннель Урана	18- 20	0	0	5	0.021	8	0.034	1	0.004
Пояс Уран- Нептун	20- 29	2	0.001	9	0.006	18	0.013	15	0.011
Туннель Нептуна	29- 31	0	0	0	0	5	0.013	1	0.003
Пояс Койпера	31- 50	0	0	10	0.002	11	0002	9	0.002

Предположив о наличии реликтовых планетезималей в межпланетных поясах в современную эпоху, авторы гипотезы постулируют, что КПК вышли на наблюдаемые орбиты из этих результате взаимных столкновений. поясов столкновительный механизм в данном случае вряд ли будет работать. Поскольку в протопланетном диске устанавливаются почти круговые движения, то столкновения маловероятны. Взаимный энергетический обмен догоняющих тел незначительным. Гипотеза выброса КПК из межпланетных поясов может быть подвергнута эмпирической проверке. Если допустить, что КПК вышли на наблюдаемые орбиты из межпланетных поясов, то узлы, как точки пересечения кометных орбит с плоскостью эклиптики, должны быть сосредоточены именно в этих поясах. Число N всех типов кометных орбит

(КПК, ДПК, ПК, ГК), пересекающих пояса и туннели на гелиоцентрических расстояниях 4 а.е. < R < 50 а.е. представлено в табл. 1.19. Здесь же дана плотность $\sigma = N/\pi (R_2^2 - R_1^2)$ узлов в соответствующих зонах на эклиптике. Как видно из таблицы, плотность σ всех типов орбит возрастает от периферии к центру. Узлы КПК в поясе Койпера и в туннеле Нептуна отсутствуют. Через пояс Уран–Нептун проходили всего две кометы. Одинаковое число КПК (N=16) проходило через пояс Юпитер–Сатурн и туннель Сатурна. «Пустой» туннель Юпитера плотно заполнен кометными ядрами — здесь пролегают пути 119 комет, или 62% от общего числа КПК, σ =1.89 (a.e.)-2. Итак, гипотеза о пустых туннелях и скоплениях КТ между планетами-гигантами не подтверждается наблюдаемым реальным распределением орбит КПК.

Местом «рождения» ДПК, по Цицину (1999), является пояс «Именно быть Койпера: может источником ОН (путем столкновений кометных тел) долгопериодических Аргументации в пользу данного предположения не приводится. Не сделана оценка вероятности столкновений, не анализируются энергетика столкновений, нет сравнения с механика И наблюдениями. Если кометные ядра вытолкнуты из пояса Койпера, то узлы кометных орбит должны находиться в этой же зоне. Однако занептунный пояс пересекают только 10 ДПК (табл. 1.19), или 4 % от всего комплекса ДПК (*N*=226). Среди десятка комет есть три кометы с обратным движением -C/1873Q1, $i=96^{\circ}.0$; C/1887B2, $i=104^{\circ}.3$; C/1987U3, $i=97^{\circ}.1$. Невозможно за счет столкновений в протопланетном диске перебросить его фрагменты на орбиты указанных комет.

Напомним, что в протопланетном диске планетезимали должны двигаться по круговым орбитам прямым движением. Орбиты трех названных комет почти перпендикулярны эклиптике $(96^{\circ} < i < 104^{\circ})$.

Предложить какие-то доказательства происхождения ДПК в поясе Койпера, видимо, не возможно. И тогда выдвигается версия, что якобы уже существует «собственная гипотеза Радзиевского о происхождении долгопериодических комет именно там, где потом обнаружили пояс Уиппла-Койпера» – Цицин (1999). На самом деле, Радзиевский (1987) создал гипотезу о происхождении комет путем извержения ледяной коры гипотетическими планетами, движущимися около галактической плоскости на гелиоцентрических расстояниях 150–160 а.е. Таким образом, гипотеза Радзиевского никакого отношения к поясу Койпера не имеет.

Гипотеза выброса планетезималей из Солнечной системы в изложении Цицина, Расторгуева и Чепуровой (1985) выглядит следующим образом: «По данным планетной космогонии, в ходе эволюции протопланетного облака образуется планетезималей, в горячей внутренней зоне – астероидного, в холодной внешней - кометного состава и размеров. Как полагают, позже не вошедшие в состав планет кометные тела планетными возмущениями были выброшены (KT) Солнечной системы». В космогонический сценарий включен акт массированного выброса планетезималей за пределы Солнечной системы или, по терминологии авторов, «в Галактику». В акт накачки КТ «в Галактику» включены и другие звезды. Цицин, Чепурова, Расторгуев (1984) предполагают, что ≪должно существовать «общегалактическое кометное сформировавшееся в результате выброса КТ из Солнечной и из других звездных систем». Предполагается огромная объемная плотность КТ в облаке. Цицин (2000) уточняет, что Галактика «нечто вроде густого «кометного киселя», в который изредка вкраплены звезды». Итак, нам предлагается «новый взгляд» на Галактику как на «кометный кисель».

Выброс планетезималей гравитационными возмущениями происходить МОГ только направлении вращения облака. Оорт полагает, что кометы уходят от Солнца на расстояние не далее чем 100-150 тысяч а.е., где тормозятся звездными возмущениями, и здесь же формируется кометное Цицину (1999),кометы преодолевают гравитационный звездный барьер за облаком Оорта, далее пересекают поверхность Хилла (поверхность отражения) и, наконец, уходят до расстояний 20-30 пк. Исследование вопроса о возможных движениях комет на больших гелиоцентрических расстояниях дано в работе Чеботарева (1964). В рамках ограниченной задачи трех тел (Солнце - ядро Галактики комета) показано, что область реальных движений кометы ограничена поверхностью нулевой относительной скорости Хилла). (поверхность Радиус сферы Хилла 230 000 а.е. для гелиоцентрического движения комет с прямым движением и 100 000 а.е. для случая обратного движения. Итак, строгие расчеты свидетельствуют о несостоятельности гипотезы выброса комет «в Галактику».

Вопрос о происхождении почти параболических комет (ППК) решен также весьма просто: ППК — это планетезимали, выброшенные из зоны планет-гигантов «в Галактику» и вернувшиеся опять в эту же зону. Кометные тела, согласно Цицину (1999), возвращаются «в область выброса в зоне планет-гигантов и еще ближе к Солнцу. Это и есть апериодические кометы». Действительно, в отсутствие возмущений, комета при каждом обращении должна проходить через место своего рождения. Однако, как видно из табл. 1.19, зону Юпитера (4 а.е. < R < 6 а.е.) пересекали лишь 27 ПК или 7% от всех почти параболических комет.

В анализируемой космогонической модели предполагается из выбрасываемых в Галактику реликтовых планетезималей получить реальные почти параболические кометы. Но для этого планетезимали необходимо сначала затормозить, а затем возвратить во внутреннюю область Солнечной системы. С этой целью вводится экзотическая гипотеза торможения комет с

помощью гуковских сил. Конкретный реальный носитель гуковской силы не указан, лишь обозначен мифическим термином «гуковское тело». Торможение якобы осуществляет гипотетическое поле: «Поле Гука отражает объект к источнику» — Цицин (1999). Подчеркнем, что до сих пор в небесной механике успешно обходились без введения в соответствующие дифференциальные уравнения какого-либо дополнительного члена, учитывающего гуковскую силу.

Если считать почти параболическими кометы, вернувшиеся из-за пределов Солнечной системы, то в комплексе ППК должны присутствовать и межзвездные кометы. Процитируем Цицина (1999): «Почему мы не видим «чужие» (с эксцентриситетом e>>1) кометы? ...количество «чужих» кометных тел может быть много больше, чем своих. Почему мы не видим их? Ответ прост... чужие почти не испытывают гравитационной фокусировки к Солнцу. Свои же в полной мере подвержены ей».

Фактически имеет место ситуация с точностью «до наоборот». Гравитационной фокусировке подвержены лишь объекты, движущиеся по гиперболам (e>1). Напомним, что гравитационная фокусировка есть свойство гравитирующего объекта отклонять проходящий мимо него поток частиц или излучения и фокусировать его вдоль антиапексиального луча. Бессмысленно говорить 0 гравитационной фокусировке применительно к эллиптическим орбитам. «Свои» кометы орбитам. Гравитационная эллиптическим ПО фокусировка могла бы направить межзвездную комету в зону видимости. Тем не менее, за всю историю астрономических наблюдений не обнаружено ни одной межзвездной кометы.

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что ни один факт не подтверждает модернизированную гипотезу о реликтовом происхождении комет. Основные постулаты гипотезы сформулированы ad hoc. При построении гипотезы авторы игнорируют принципы теории познания — от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике. Авторы не опираются на наблюдения — не используют данные

кометных каталогов, не пытаются объяснить известные закономерности в кометной системе.

Подводя итоги вышеизложенному, отметим основные показывающие несостоятельность аргументы, гипотезы реликтовом происхождении комет: 1. Постулат тождественности реликтовых планетезималей и современных кометных ядер за более чем полувековую историю реликтовой получил астрофизического обоснования. гипотезы 2. Неправдоподобность версии о кометном «облаке» на далёкой периферии Солнечной системы. Доказательств существования этого облака не имеется. Кривая распределения комет по значениям 1/a получена некорректно. Идея «облака» возникла в результате безальтернативной интерпретации кривой 1/a. 3. Параметры гипотетической кометной системы не согласуются с наблюдениями. На основании постулата о выбросе реликтовых планетезималей планетами-гигантами, гипотетическая кометная система должна концентрироваться к плоскости эклиптики, а кометы должны иметь только прямые движения. Но орбиты реальных почти параболических комет имеют изотропное пространственное распределение, в распределении по наклонам преобладают кометы с обратным движением. В распределении комет по величине объёмной плотности афелиев имеется максимум на гелиоцентрическом расстоянии 150-200 а.е. С увеличением расстояния в направлении «облака» плотность афелиев резко падает. 4. Безосновательна версия о реликтовых межпланетных резервуарах кометных ядер как источника короткопериодических комет. 5. Выброс реликтовых кометных тел из зоны планет-гигантов за пределы сферы Хилла, «в Галактику» и последующее их возвращение в Солнечную систему в виде почти параболических комет – явление из разряда абсолютно невероятных.

Fellgett (1977) указал, что концепция кометного облака основана на рассуждениях, нарушающих требования научной методологии — требовании минимальности специальных гипотез.

ГЛАВА 2. КОМЕТЫ И ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 2.1. Кометы и транснептуновые планеты

извержения Сторонники гипотезы связывают происхождение комет с Плутоном и даже с одним из объектов пояса Койпера. Предположение о том, что транснептуновый объект 2003 UB 313 (136199 Eris) является источником комет, высказано в работе Гулиева (2007). Объект 2003 UB 313 ниже кратности будем называть Эридой. космогонической версии Гулиева сводится к следующему. Подбирается плоскость, на которой число узлов кометных орбит максимально в интервале гелиоцентрических расстояний от q = 37.8 a.e. до Q = 97.6 a.e., где q и Q — перигелийное и афелийное расстояние Эриды. Базовой плоскостью принята плоскость движения Эриды:

$$\Omega = 35^{\circ}.875$$
; $i = 44^{\circ}.177$. (2.1)

Оказалось, что в интервале

$$q = 37.8 \text{ a.e.} < R < 97.6 \text{ a.e.} = Q$$
 (2.2)

расположены узлы орбит 78 долгопериодических комет из общей совокупности N=860 комет. Далее проводятся статистика кометной системы по различным параметрам и вероятностные оценки с целью подтвердить близость кометных орбит к орбите объекта 2003 UB 313. В результате сделан вывод о том, что самыми реальными кандидатами на роль инжектируемых объектом 2003 UB 313 являются 7–8 комет, у которых узловые расстояния находятся в пределах \pm 1.5 а.е. от гелиоцентрических расстояний точек орбиты этого объекта.

Гипотеза о связи комет с Плутоном изложена в статьях Гулиева и Набиева (2002, 2004, 2005). Попытка установить кинематическую связь кометных орбит с орбитой Плутона

проводится по той же схеме, что и в статье Гулиева (2007). Описана статистика 59 кометных орбит с множеством вероятностных оценок с целью определить кометное семейство Плутона.

Космогонический аспект гипотезы представляется весьма сомнительным, поскольку не рассматривается физическое взаимодействие комет с Плутоном и объектом 2003 UB 313. Для проверки гипотезы Гулиева применим каталог (Marsden, Williams, 2005), дополненный кометами, открытыми после 2005 г. Из этого каталога будем использовать почти параболические кометы (ППК, период P>100 лет.) с перигелийным расстоянием q>0.1 а.е. В состав ППК входят: а) эллиптические орбиты (эксцентриситет e<1, P>100 лет, N=81), б) параболические орбиты (e=1), большая полуось $a=\infty$, N=417), в) гиперболические орбиты (e>1), a<0, N=211).

Во многих космогонических гипотезах узел кометной орбиты рассматривается как место «рождения» кометы. Известно, что большинство короткопериодических комет (КПК) вышли на современную орбиту из сферы действия Юпитера. Место инжекции кометы и есть узел ее орбиты. Характерно, что в области выброса кометы расположены узел и афелий ее орбиты и, естественно, планета на момент выброса кометы.

Для всех комет мы вычислили и включили в каталог значения гелиоцентрического расстояния восходящего R_A и нисходящего R_D узла кометных орбит

$$R_A = \frac{q(1+e)}{1+e\cos\omega}; \ R_D = \frac{q(1+e)}{1-e\cos\omega},$$
 (2.3)

где q, e, ω — перигелийное расстояние, эксцентриситет и аргумент перигелия. Узел, независимо от того восходящий или нисходящий, но расположенный от Солнца на меньшем расстоянии (R_{\min}), будем называть ближним. Противоположный узел, имеющий большее гелиоцентрическое расстояние (R_{\max}), назовем дальним.

В табл. 2.1 дано распределение на плоскости эклиптики 1784 узлов 892 ППК. Максимальное число узлов (N=728, или 40.8% от общего числа) расположено на гелиоцентрических

расстояниях R<2 а.е. В зоне планет земной группы плотность узлов $\sigma = n/\pi (R_2^2 - R_1^2)$ составляет 57.93 (а.е.)⁻². Далее плотность резко падает.

Таблица 2.1. Распределение узлов и перигелиев почти параболических комет

R, a.e		Узлы	Перигелии		
	N	σ , (a.e.) $^{-2}$	N	σ , (a.e.) $^{-3}$	
0–2	728	57.93	651	19.43	
2–4	310	8.22	154	0.66	
4–6	147	2.34	64	0.10	
6–8	95	1.08	18	$1.45 \cdot 10^{-2}$	
8–10	57	0.50	4	$1.96 \cdot 10^{-3}$	
10–20	142	0.15	1	$3.41 \cdot 10^{-5}$	
20–30	62	$4 \cdot 10^{-2}$	_	_	
30–40	33	$1.5 \cdot 10^{-2}$	_	_	
40–50	28	$9.90 \cdot 10^{-3}$	_	_	
50-60	10	$2.89 \cdot 10^{-3}$	_	_	
60–70	13	$3.18 \cdot 10^{-3}$	_	_	
70–80	13	$2.76 \cdot 10^{-3}$	_	_	
80–90	9	$1.69 \cdot 10^{-3}$	_	_	
90–100	5	$8.38 \cdot 10^{-4}$	_	_	
100-200	32	$3.40 \cdot 10^{-4}$	_	_	
200-300	23	$1.46 \cdot 10^{-4}$	_	_	
300–400	18	$8.19 \cdot 10^{-5}$	_	_	
400–500	8	$2.83 \cdot 10^{-5}$	_	_	
500-1000	19	$8.06 \cdot 10^{-6}$	_	_	
>1000	32		_	_	

На гелиоцентрических расстояниях 30–40 а.е. расположено всего лишь 15 узлов на $1000 \, (\text{а.e.})^2$ На периферии Солнечной системы $\sigma \to 0$. Перигелии обнаруживают еще более высокую степень концентрации в близкой около солнечной области (табл. 2.1): 651 перигелий (73%) расположены на гелиоцентрических расстояниях R < 2 а.е., объемная плотность

перигелиев здесь составляет $\sigma = 19.43 (a.e.)^{-3}$. В зоне Юпитера $\sigma = 0.10$ (a.e.) Таким образом, орбиты реальных ППК пронизывают Солнечную систему в основном через зону планет земной группы.

На периферии Солнечной системы плотность узлов очень мала (табл. 2.1). По версии Гулиева, далекие узлы порождены возмущающим действием далеких планет. По нашему мнению, наличие кометных узлов на периферии Солнечной системы есть следствие ориентации орбиты в плоскости движения кометы, что, как известно, определяется величиной угла восходящего узла до перигелия. Как видно из (2.3), величина гелиоцентрического расстояния узла фиксированных при значениях q и e зависит только от аргумента перигелия ω . Расстояние до восходящего узла R_{A} будет максимально большим при $\omega \to 180^{\circ}$. Максимальное значение до нисходящего узла R_D будет иметь место при $\omega \to 0$. Графически теоретическая зависимость $R_A(\omega)$ и $R_D(\omega)$ представлена на рис. 2.1. При построении кривых принято e = 1, q = 2 a.e. Темным цветом изображена кривая $R_A(\omega)$, серым цветом – кривая $R_D(\omega)$.

Зависимость $R_A(\omega)$ и $R_D(\omega)$ для реальных комет на рис. 2.1 дана в виде диаграммы, где темные квадратики соответствуют восходящим узлам, серые — нисходящим для каждой конкретной кометы. Точки (квадратики) лежат около теоретических кривых, что свидетельствует о согласии наблюдательных данных с теоретическим прогнозом. Из рис. 2.1 видно, что гелиоцентрическое расстояние восходящего узла $R_{\text{max}} > 10$ а.е. имеют орбиты с аргументом перигелия 120° < ω <240°.

Гелиоцентрическое расстояние нисходящего узла $R_{\rm max} > 10$ а.е. имеют орбиты с аргументом перигелия $300^{\circ} < \omega < 60^{\circ}$.

Другими словами, дальний узел окажется на гелиоцентрическом расстоянии R>10 а.е., если угол между линией узлов и линией апсид будет не более 60° . Таким образом наличие дальних узлов в системе кометных орбит естественным

образом объясняется ориентацией перигелия по отношению к восходящему узлу.

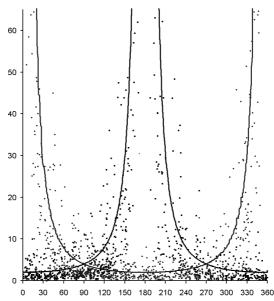


Рис. 2.1. Диаграмма «Гелиоцентрическое расстояние узлов – аргумент перигелия»

Объект 2003 UB 313 и кометы. Хорошо известно, что у комет семейства Юпитера афелий и узел лежат около орбиты планеты. В случае захвата комет планетами (Томанов, 1980) должно выполняться приближенное равенство афелийного расстояния кометной орбиты Q, гелиоцентрического расстояния дальнего узла R_{\min} и большой полуоси орбиты планеты A:

$$Q \approx R_{\min} \approx A$$
. (2.4)

По версии Гулиева, источником 78 комет мог быть Eris. Для этих комет распределение дальних узлов на эклиптике приведено в левой части табл. 2. 54 узла, или 69% расположены от Солнца не далее 30 а.е., 3 узла находятся на расстоянии более 600 а.е. У кометы C/1538 A1 гелиоцентрические расстояния узлов на эклиптике составляют $R_{\rm A}$ =0.23 а.е, $R_{\rm D}$ =0.42 а.е. У кометы C/1896 C1 соответственно $R_{\rm A}$ =0.59 а.е., $R_{\rm D}$ =2717 а.е. Таким образом, дальние узлы на эклиптике лежат в интервале от

0.42 а.е. до 2717 а.е. Все узлы, лежащие в этом огромном диапазоне гелиоцентрических расстояний, Гулиев переводит в узкий интервал (2.2) путем изменения системы координат и смешения начала отсчета.

Распределение афелиев эллиптических орбит из списка Гулиева приведено в правой части табл. 2.2. Еще раз подчеркнем, что концентрироваться к орбите «родительской» планеты обязаны и узлы, и афелии кометных орбит. Однако в интервале афелийных расстояний Q<125 а.е. значимого максимума афелиев не наблюдается, здесь расположено всего 6 афелиев.

Таблица 2.2. Распределение дальних узлов и афелиев комет, кандидатов в "семейство" Eris

Rmax, a.e.	N	$oldsymbol{Q}$ a.e.	N
0–10	33	0–75	1
10–20	15	75–100	3
20–30	6	100-125	2
30–40	2	125–150	1
40–50	2	150–175	1
50–100	5	175–200	_
100-200	3	200-300	_
200-300	3	300-400	2
300–400	3	400-500	2
400-500	2	500-1000	4
500-600	1	1000-5000	14
>600	3	>5000	7
Всего	78		37

Поскольку в списке Гулиева эллиптических орбит всего 37, то рассмотрим распределение узлов и афелиев 84 орбит с e<1 и периодом P>100 лет.

На рис. 2.2 гистограмма, выполненная тонкими линиями, показывает распределение дальних узлов, жирными линиями показано распределение афелиев. Четко выраженный максимум

афелиев расположен около 5 а.е. Узлы расположены вдоль всей шкалы с множественными флуктуациями. Подводя итоги вышеизложенному, можно констатировать, что равенство (2.4) не выполняется, дальние узлы и афелии кометных орбит не имеют кинематической связи с объектом 2003 UB313.

Представляет интерес проверить взаимное расположение ближних узлов и перигелиев, используя 84 эллиптические орбиты с P>100 лет. На рис. 2.3 гистограмма, выполненная тонкими линиями, дает распределение ближних узлов по величине гелиоцентрического расстояния R_{\min} . Распределение перигелиев изображено жирными линиями.

Близкое сходство обеих гистограмм свидетельствует о том, что величина перигелийного расстояния приблизительно равна гелиоцентрическому расстоянию ближнего узла: $q \approx R_{\min}$. Простой просмотр кометного каталога показывает, что данное приближенное равенство выполняется для большинства почти параболических комет.

В работах Томанова (1984, 1989) показано, что перигелии и узлы ярких комет и комет с прямыми движениями (i<90°) концентрируются к орбитам планет земной группы. Таким образом, для некоторого класса комет выполняется приближенное равенство

$$q \approx R_{\min} \approx A$$
, (2.5)

где A — большая полуось соответствующей планеты земной группы. Таким образом, есть основания для исследования проблемы генетической связи ППК с планетами земной группы, как альтернативы гипотезе Гулиева.

Если Гулиев считает транснептуновый объект 2003 UB 313 источником комет, то отсюда следует, что минимальное расстояние кометы от планеты не должно быть больше радиуса ρ сферы действия планеты $\rho = R(m_{nn}/m_c)^{2/5}$, где R – гелиоцентрическое расстояние планеты, $m_{пл}$ и m_c – массы планеты и Солнца. Такие сближения комет называют тесными.

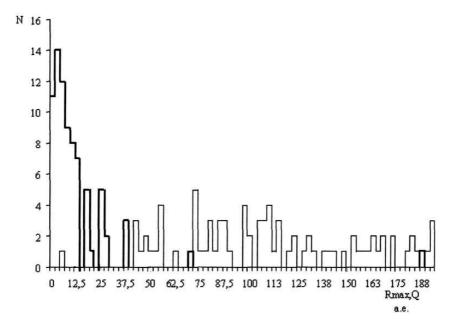


Рис. 2.2. Распределение дальних узлов и афелиев

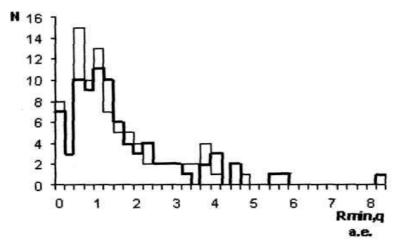


Рис. 2.3. Распределение ближних узлов и перигелиев

Полагая массу объекта 2003 UB 313 равной массе Плутона, а расстояние R равное величине афелийного расстояния

Q=97.6 а.е., получим ρ =0.055 а.е. Радиус сферы действия этого объекта в перигелии составляет всего лишь ρ =0.021 а.е. Площадь наибольшего сечения сферы действия Юпитера в 40 раз больше, чем соответствующее сечение астероида Eris. Сечение сферы действия планеты есть некая мишень, попадая в которую комета может быть захвачена. Исключительно малая мишень у астероида — одна из причин малой вероятности захвата.

Вторая причина низкой эффективности захвата — малая плотность потока комет в зоне движения астероида. Поток комет может характеризовать число пересечений комет на плоскости эклиптики на единице ее площади или, что то же самое, плотность узлов. Из табл. 2.1 легко получить отношение плотности кометных узлов в зоне Юпитера к плотности на расстояниях 40-50 а.е.: $2,34/9.9\cdot10^{-3}=236$. Видимо, по этой причине численность кометных семейств короткопериодических комет зависит от расстояния «родительской» планеты от Солнца. По итогам численного интегрирования уравнений движения 274 КПК на интервале 6000 лет (Томанов и др., 2005) обнаружено, что тесные сближения с Юпитером имели 206 комет, три кометы приближались к Сатурну на расстоянии r < 0.02 а.е. С Ураном сближалась лишь одна комета — C/1999 E1 Li. Сближений комет с Нептуном и Плутоном не обнаружено.

Третья причина снижения числа захваченных заключается в том, что каждая планета способна захватывать выборочно лишь определенный класс комет с заданными орбитами. Проиллюстрируем это на примере Юпитера. Everhart (1972), исследуя методом Монте-Карло миллионы фиктивных что Юпитер захватывает перигелийным расстоянием q = 4-6 а. е. и с наклоном $i<8^\circ$. Аналогичный критерий должен иметь место и в отношении объекта 2003 UB 313: данный объект мог бы захватывать кометы с 40 а.е.< q < 100 а.е. и наклоном i около 45°. Однако вряд ли существуют кометы с такими большими значениями перигелийного расстояния. Большинство реальных комет имеют *q*<2 a.e. наибольшее (табл.1), значение перигелийного расстояния q=11.4 а.е. принадлежит комете C/2003 A2. Остается допустить, что базой для захвата комет объектом 2003 UB 313 являются невидимые с Земли гипотетические кометные ядра.

Определим теперь минимальное расстояние орбитами Эриды и соответствующей кометы. Минимальное расстояние Δ_{\min} между орбитами двух тел можно представить как минимальное расстояние между телами, движущимися по кеплеровым орбитам. Положение тела на орбите с известными элементами зависит от истинной аномалии 9 Таким образом, расстояние Δ_{\min} можно определить как функцию \mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_2 . Задачу нахождения минимума функции $\Delta(\mathcal{G}_1,\mathcal{G}_2)$ можно решить численно, используя методы минимизации функции двух переменных. Оказалось, что наименьшее $\Delta_{\min} = 0.02$ а.е. имеет комета C/1968 U1. Для 56 комет из 78 $\Delta_{\min} > 1$ а.е. (табл. 2.3). Наиболее весомым аргументом в пользу существования связи между Эридой и рассматриваемыми кометами является наличие тесных сближений между ними в прошлом. Для определения расстояния между Эридой и кометами нами рассчитывались эфемериды этих тел на промежутке от 2000 г. до -3000 г. Расчеты проводились с использованием программы ЭПОС с учетом возмущений от всех планет для комет и от планет-Эриды, шагом интегрирования гигантов ДЛЯ относительно барицентра Солнечной системы. Минимальное расстояние r_{\min} между Эридой и соответствующими кометами на исследуемом интервале представлено в третьей колонке таблицы 3. Как видим, ни одна комета не прошла через сферу действия Эриды. Максимальный радиус сферы действия этого трансплутонового объекта равен 0.055 а.е. Ближе всего к Эриде прошла комета C/1810 Q1, наименьшее расстояние $r_{\min} = 3.027$ а.е. Для семи комет $r_{\min} < 10$ а.е. Для остальных комет величина r_{\min} выражается десятками астрономических единиц (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Минимальное расстояние между орбитами Эриды и кометы Δ_{\min} , минимальное расстояние r_{\min} между этими объектами

Комета	Δ_{\min} , a.e.	r_{\min} , a.e.	Комета	Δ_{\min} , a.e	r_{\min} , a.e.
C/2001 W1	2.97	99.336	C/2002 R3	3.41	97.477
C/1991 Q1	2.52	96.227	C/1892 W1	0.25	59.400
C/1943 W1	0.50	95.965	C/1930 E1	2.94	31.808
C/2002 P1	9.13	100.276	C/1790 A1	0.37	30.185
C/2002 F1	2.42	97.130	C/1948 R1	4.84	91.231
C/1997 G2	3.77	91.521	C/1997 BA6	3.16	96.582
C/1304 Y1	2.55	44.399	C/2003 L2	1.60	36.570
C/2003 K1	0.81	9.076	C/1989 X1	0.04	69.556
C/1968 L1	5.59	80.774	C/1999 K3	1.26	13.469
C/1925 F2	2.38	15.542	C/2003 G1	2.73	90.186
C/1973 N1	13.33	15.709	C/1968 Q2	0.95	96.145
C/1999 T3	0.22	92.076	C/2005 L2	0.22	62.567
C/1997 J1	6.75	51.313	C/2004 X2	0.17	92.625
C/1900 B1	0.71	91.175	C/2001 A2	0.06	92.396
C/2004 K1	14.95	27.904	C/1881 W1	0.82	59.625
C/1853 G1	8.18	16.342	C/1999 K8	5.94	94.375
C/1860 U1	0.19	84.010	C/2000 T54	1.13	102.533
C/1973 D1	3.06	85.808	C/1997 A1	2.66	91.723
C/1538 A1	0.10	53.993	C/1618 V1	1.96	60.351
C/2001 O2	1.66	94.923	C/1884 A1	0.17	44.679
C/1999 J4	3.94	69.553	C/1940 O1	4.03	7.426
C/1810 Q1	1.63	3.027	C/1888 P1	0.35	32.183
C/1857 D1	3.17	4.007	C/1892 F1	2.78	44.136
C/2003 G2	7.42	40.774	C/1968 U1	0.02	10.388
C/1857 O1	1.81	6.414	C/2004 B1	2.68	44.800
C/1723 T1	1.50	3.027	C/2004 L2	4.57	53.622
C/1980 E1	6.39	62.357	C/1989 Q1	1.48	14.135
C/2004 DZ61	20.38	19.786	C/1582 J1	0.29	12.919
C/1903 M1	1.07	41.528	C/2001 A1	1.30	10.482
C/1861 J1	0.10	11.334	C/2003 V1	1.38	73.064
C/2003 S4	3.60	8.190	C/2003 J1	7.54	15.859
C/2004 U1	1.19	103.394	C/1952 Q1	4.97	52.507
C/1989 A5	4.61	59.105	C/1896 C1	0.11	82.495
C/1822 K1	1.84	74.033	C/1796 F1	1.76	63.768
C/1992 U1	0.55	85.701	C/2002 V2	9.40	77.000
C/1986 E1	13.15	15.310	C/1990 E1	1.42	15.859
C/1987 Q1	1.65	67.528	C/1981 H1	0.23	82.451
C/1813 G1	3.70	71.083	C/1956 F1-A	1.52	19.880

Таким образом, бессмысленно говорить об Эриде, как источнике комет.

Основой космогонической версии Гулиева является ошибочный тезис о тождественности величины минимального расстояния r_{\min} между орбитой Эриды и кометы и реального расстояния r_{\min} Эрида — комета. Ошибочность этого тезиса нетрудно видеть из сравнения второй и третьей колонок табл. 2.3. К примеру, межорбитальное расстояние кометы C/1968 U1 равно 0.02 а.е., а расстояние Эрида — комета r_{\min} = 10.39 а.е. Фактически вся статья Гулиева (2007) посвящена попытке обосновать этот тезис методами математической статистики и теории вероятностей. Ссылки на то, что кометы сближались с Эридой в прошлом неуместны. Дело в том, что кандидаты в «семейство» Эриды (табл. 2.3) двигаются преимущественно по параболам (эксцентриситет e=1) и гиперболам (e>1) и, следовательно, проходят через зону планет впервые.

Плутон и кометы. В трех статьях с общим названием «Плутон и кометы» Гулиев и Набиев (2002, 2004, 2005) излагают гипотезу о происхождении комет в системе Плутона. Космогонические построения ведутся по следующей схеме:

1. Подсчитано число узлов кометных орбит на плоскости движения Плутона

$$\Omega = 17^{\circ}.1; i = 110^{\circ}$$
 (2.6)

в интервале гелиоцентрических расстояний

$$q = 29.5 \text{ a.e.} < R < 49.5 \text{ a.e.} = Q,$$
 (2.7)

где q и Q — перигелийное и афелийное расстояния орбиты Плутона.

Оказалось, что на интервале (2.7) расположено 59 узлов из общего числа дальних узлов 724 почти параболических комет (период P > 1000 лет). 59 комет (табл. 2.4) считаются кандидатами в «семейство» Плутона. Заметим, что четыре кометы из представленных в таблице, по нашим данным, не имеют узлов в интервале (2.12): C/1490 Y1, C/1999 J2, C/1999 S3, C/2001 G1.

2. Вторую задачу авторы формулируют следующим образом: «Выявить степень различия отобранных комет от

общей совокупности». Для решения этой задачи применяются методы математической статистики и теории вероятностей. В конечном итоге авторы заключают, что «предположение о взаимосвязи комет с Плутоном касается лишь 2–3 % общей совокупности известных комет». Конкретные кометы, динамически связанные с Плутоном, не называются.

3. Качественно обсуждаются физические механизмы, которые могли бы обеспечить «производство» комет Плутоном: механизм захвата, эруптивный и столкновительный механизмы. Для выявления связи комет с Плутоном принят единственный критерий близости кометных *орбит* к *орбите* Плутона. Близкими к орбите Плутона принимаются орбиты, которые лежат в интервале гелиоцентрических расстояний (2.2). Однако близость кометных орбит к орбите планеты более точно может характеризовать величина межорбитального расстояния Δ_{\min} .

Мы вычислили минимальное расстояние Δ_{\min} кометных орбит от орбиты Плутона (вторая колонка таблицы). Из табл. 2.4 видно, что 27 комет имеют $\Delta_{\min} > 1$ а.е. Вряд ли эти кометы могли быть динамически связаны с Плутоном, радиус действия которого $\rho = 0.026$ a.e. C другой стороны, 7 комет имеют $\Delta_{\min} < 0.1$ а.е., среди них комета С/2003 Н2, орбита которой отстоит от орбиты Плутона на минимальное расстояние $\Delta_{\min} = 0.01 \; \text{a.e.} < \rho$. Однако близость кометных орбит к орбите Плутона отнюдь не свидетельствует о наличии генетической связи комет с планетой. Если даже орбиты пересекаются, то это не значит, что в точке пересечения одновременно окажутся и комета, и планета. В момент пересечения кометой орбиты Плутона планета может находиться в любой точке своей орбиты. Расстояние между кометой и Плутоном может быть, к примеру, равно большой оси 2а орбиты Плутона. Ниже покажем, что минимальные расстояния от комет до планеты составляют десятки астрономических единиц.

Если Плутон порождает кометы в результате извержения или столкновения, то кометная орбита должна начинаться на поверхности планеты. Если в основе происхождения комет

лежит механизм захвата, то комета должна была пройти через сферу действия планеты. Это означает, что минимальное расстояние r_{\min} кометы от планеты должно быть меньше радиуса ρ сферы действия Плутона $r_{\min} < \rho = 0.026$ а.е.

Таблица 2.4. Минимальные расстояния r_{\min} комет от Плутона

Комета	Δ_{\min} , a.e.	r_{\min} , a.e.	Комета	Δ_{\min} , a.e.	r_{\min} , a.e.
C/1018 P1	0.93	17.26	C/1974 V2	1.01	24.87
C/1110 K1	0.63	47.02	C/1975 V1-	0.34	30.08
C/1345 O1	0.13	47.24	C/1980 E1	0.48	25.51
C/1362 E1	0.07	47.22	C/1980 L1	0.02	29.67
C/1490 Y1	15.08	26.83	C/1986 E1	0.12	22.27
C/1743 C1	0.17	5.12	C/1986 N1	0.87	20.91
C/1781 1	0.98	35.53	C/1988 B1	2.36	28.65
C/1785 A1	1.62	24.27	C/1988 C1	1.27	28.82
C/1796 F1	1.89	17.46	C/1989 A1	1.55	25.85
C/1798 X1	0.98	39.46	C/1991 T2	3.64	28.82
C/1825 P1	0.08	45.17	C/1997 A1	1.80	22.87
C/1844 Y1	0.08	46.92	C/1998 M2	0.61	27.01
C/1846 B1	0.22	30.44	C/1999 J2	5.43	26.49
C/1853 1	1.65	46.71	C/1999 K3	2.53	27.91
C/1860 U1	0.69	48.45	C/1999 K8	2.93	2.87
C/1864 N1	0.17	7.09	C/1999 L3	0.10	8.01
C/1874 X1	1.10	19.66	C/1999 N2	0.04	29.40
C/1879 1	0.45	48.00	C/1999 S2	7.52	19.01
C/1887 B2	0.05	1.39	C/1999 S3	18.04	20.10
C/1887 B3	2.18	5.57	C/1999 S4	1.87	33.12
C/1888 D1	0.92	24.39	C/2001 X14	1.46	36.29
C/1903 H1	1.14	46.05	C/2001 G1	5.29	32.38
C/1904 Y1	1.25	35.68	C/2002 A3	0.42	35.79
C/1906 V1	0.37	0.69	C/2002 C2	2.06	6.35
C/1917 H1	0.96	10.25	C/2002 L9	1.42	19.54
C/1947 F2	0.13	36.07	C/2002 Q5	0.33	39.31
C/1963 W1	0.23	20.29	C/2002 T7	0.34	43.58
C/1964 P1	0.93	29.05	C/2003 H2	0.01	0.66
C/1972 L1	5.36	27.95	C/2003 U1	1.14	1.44
C/1974 V1	4.05	31.57			

Для вычисления r_{\min} мы провели численное интегрирование уравнений движения комет на временном интервале 5000 лет от 2000 г. до -3000 г. Для вычислений

использована программная система ЭПОС, созданная в ГАО РАН. В данной программе применен интегратор Эверхарта с точностью LL=8, порядком NOR=15 и планетная эфемерида Стэндиша DE406 на 6000 лет.

В третьей колонке табл. 2.4 приведены минимальные расстояния r_{\min} от комет до Плутона. Как видим, ни одна комета не прошла через сферу действия планеты. Величина минимального расстояния r_{\min} от Плутона для 10 комет составляла от 0.69 а.е. до 10 а.е., 27 комет имели 10 а.е. $< r_{\min} < 30$ а.е., для 22 комет — 30 а.е. $< r_{\min} < 48.5$ а.е. Отсутствие тесных сближений комет с Плутоном свидетельствует о несостоятельности гипотезы о происхождении комет в системе Плутона.

Основой космогонической версии (Гулиев, Набиев, 2002, 2004, 2005) является ошибочный тезис о тождественности величины минимального расстояния Δ_{\min} между орбитами Плутона и кометы и реального расстояния r_{\min} Плутон-комета. Ошибочность этого тезиса нетрудно видеть из сравнения второй и третьей колонок табл. 2.4. К примеру, для кометы С/1844 Y1 $\Delta_{\min} = 0.08$ а.е., $r_{\min} = 46.92$ а.е. Ссылки на то, что кометы сближались с Плутоном в прошлом неуместны.

Дело в том, что кандидаты в «семейство» Плутона двигаются преимущественно по параболам (эксцентриситет e=1) и гиперболам (e>1) и, следовательно, проходят через зону планет впервые. Не адекватные космогонические выводы получены на основе статистики. Кстати, подтверждается известный афоризм о роли статистики.

§ 2.2. Нептун и кометы

В кометной космогонии роль планет рассматривается в двух аспектах: гравитационный захват планетами межзвездных комет (Laplace, 1796) и выброс комет на гелиоцентрические орбиты с поверхности планет или их спутников (Lagrange, 1812) Захват фиктивных комет Нептуном рассмотрен в работе Казимирчак-Полонской (19786). В гипотезе Гулиева (1993)

предполагается, что кометы извергаются из системы Нептуна. Всехсвятский (1967) приводит список периодических комет семейства Нептуна, состоящий из 11 объектов с периодом обращения P от 62 лет до 120 лет.

Настоящий параграф посвящен исследованию проблемы связи комет с Нептуном. Критерием, определяющим связь кометы с планетой, будем считать факт тесного сближения кометы с планетой. Напомним, что тесным называют такое сближение, при котором расстояние r кометы от планеты меньше радиуса ρ сферы действия планеты. Другими словами, комета находится в сфере действия Нептуна, если

$$r < \rho = 0.585$$
 a.e. (2.8)

Физическое взаимодействие с Нептуном могли иметь лишь те кометы, орбиты которых проходят вблизи орбиты планеты. Учитывая, что большая полуось орбиты Нептуна A=30.0 а.е., отберем из каталога Marsden и Williams (2005) кометы с афелийным расстоянием в пределах 28 а.е. < Q < 33 а.е. и с периодом обращения P < 200 лет. Всего таких комет 11. В табл. 2.5 приведено минимальное расстояние Δ_{\min} орбит этих комет от орбиты Нептуна. Как видим, кометные орбиты расположены довольно далеко от орбиты Нептуна. Ближе всего к орбите планеты расположена орбита кометы C/2002 A1 — $\Delta_{\min} = 1.42$ а.е. Минимальное расстояние орбиты кометы 13P от орбиты Нептуна составляет $\Delta_{\min} = 16.23$ а.е. Очевидно, что при столь больших расстояниях Δ_{\min} физического взаимодействия комет с Нептуном быть не могло.

Значения Δ_{\min} получены для комет в последнем появлении. Однако в ходе эволюции величина Δ_{\min} могла изменяться. Рассмотрим теперь возможность тесных сближений комет с Нептуном в соответствии с соотношением (2.8). Для определения минимального расстояния r_{\min} комета — Нептун мы провели численное интегрирование уравнений движения комет на временном интервале 6000 лет. Для интегрирования использовалась программная система ЭПОС, разработанная в ГАО РАН. В данной программной системе применяется

интегратор Эверхарта и планетная эфемерида DE406 на 6000 лет.

Результаты вычисления r_{\min} приведены в табл. 2.5. Здесь же дана дата t, соответствующая указанному значению r_{\min} . Легко видеть, что за период от -3000 г. до 2000 г. 6 комет подходили к Нептуну на расстояния 3.46 а.е. $< r_{\min} < 14.84$ а.е. Еще 5 комет после 2000 г. будут подходить к Нептуну на расстояние 3.21 а.е. $< r_{\min} < 16.19$ а.е. На рис. 2.4 приводится график изменения расстояния r кометы 165P от Нептуна. Комета не приближалась к Нептуну ближе 7 а.е. Таким образом, нет оснований считать Нептун «родительской» планетой периодических комет.

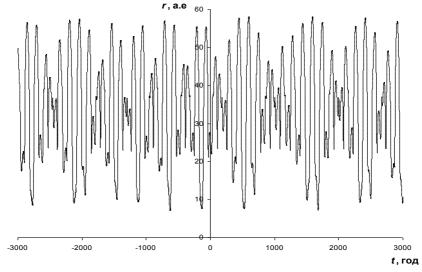


Рис. 2.4. Изменение расстояния между Нептуном и кометой 165Р

Наличие кометных афелиев в зоне Нептуна может быть следствием возмущающего действия планет-гигантов. Для определения радиуса A орбиты планеты, вызвавшей возмущение элементов орбиты кометы, можно использовать критерий Радзиевского-Тиссерана:

$$A = \left[\frac{2\sqrt{(1+e_1)q_1}\cos i_1 - 2\sqrt{(1+e_2)q_2}\cos i_2}{a_2^{-1} - a_1^{-1}} \right]^{2/3}, \quad (2.9)$$

где индексы 1 и 2 относятся к двум различным появлениям кометы.

Таблица 2.5. Характеристики короткопериодических комет, кандидатов в семейство Нептуна

Комета	Имя	Q, a.e.	q, a.e.	e	<i>P</i> , лет	Δ_{\min} , a.e.	r _{min} , a.e.	t
C/1999 E1	Li	28.7	3.920	0.75979	66	6.35	4.73	032779
C/1827 M1	Pons- Gambart	29.0	0.807	0.94584	58	5.47	3.46	051214
165P	LINEAR	29.2	6.830	0.62072	76	5.18	7.13	09629
20D	Westphal	30.0	1.254	0.91983	62	14.63	14.84	10.1294
C/1921 H1	Dubiago	30.3	1.115	0.92909	62	10.39	9.73	012254
C/2002 A2	LINEAR	31.4	4.709	0.73902	77	1.54	3.97	06.2809
C/2002 A1	LINEAR	31.7	4.714	0.74096	78	1.42	3.34	121957
C/1999 XS87	LINEAR	32.1	2.772	0.84102	73	3.12	3.21	03.2958
C/2000 D2	LINEAR	32.3	2.298	0.86711	72	9.23	8.32	051644
C/2002 K4	NEAT	32.3	2.765	0.84229	73	5.06	6.14	02.928
13P	Olbers	32.6	1.178	0.93033	70	16.23	16.19	07.2821

Данный критерий получен на основе критерия Тиссерана о равенстве постоянной Якоби для различных систем элементов кометных орбит (Радзиевский, 1987). В двух появлениях наблюдалась комета 20D, в трех появлениях — комета 13P. Вычисление по формуле (2.9) дало для кометы 20D значение A = 5.40 а.е. Для кометы 13P получено три значения A = 5.33, 5.59, 5.48 а.е. Таким образом, определяющую роль в динамической эволюции данных комет играл Юпитер.

Орбиты почти параболических комет (ППК, период P > 200 лет) концентрируются к орбитам больших планет (Томанов, 1984). Группы ППК, орбиты которых располагаются вблизи орбит планет, Коноплева (1980) именует кометными семействами. Существует гипотеза (Гулиев, Набиев, 2001, 2005)

о генетической связи ППК с Плутоном. По версии Гулиева (2007) транснептуновый объект 2003 UB 313 является источником комет, в том числе ППК.

Ниже будем рассматривать проблему динамической связи ППК с Нептуном. К семейству Нептуна предварительно отнесем ППК, у которых гелиоцентрическое расстояние $R_{\rm max}$ узла орбит лежит в интервале 28 а.е. $< R_{\rm max} < 32$ а.е. Всего таких комет 21. В табл. 2.6 приведено минимальное расстояние $\Delta_{\rm min}$ орбит этих комет от орбиты Нептуна.

Как видим, кометные орбиты проходят исключительно близко к орбите Нептуна: 11 комет имеют $\Delta_{\min} < \rho = 0.585$ a.e., для остальных комет $\Delta_{\min} < 2\rho$.

Для определения реального минимального расстояния r_{\min} Нептуном кометой И МЫ провели численное интегрирование уравнений движения комет помошью программной системы ЭПОС. Значения r_{\min} приведены в табл. 2.6. Здесь же указана дата t, когда расстояние комета – Нептун оказалось минимальным r_{\min} . За период 6000 лет ни одна из комет не проходила через сферу действия Нептуна. Для 5 комет величина r_{\min} составляла от 0.86 а.е. – комета C/2005 O1, до 8.14 а.е. – комета C/1977 V1. 16 комет имели $r_{\min} > 10$ а.е. В порядке иллюстрации на рис. 2.4 приведено изменение расстояния r кометы C/1989 R1 от Нептуна на интервале времени 6000 лет.

В заключение отметим, что вычисления по выявлению тесных сближений проводились без учета негравитационных эффектов. Считаем, что это обстоятельство не повлияло на конечные результаты, поскольку величина негравитационных эффектов для нашей задачи — величина бесконечно малая. Так изменения в большой полуоси кометной орбиты составляют $\Delta a = 10^{-7}$ a.e. Кроме того, действие негравитационных сил имеет место лишь на гелиоцентрических расстояниях r < 3 a.e.

Таблица 2.6. Характеристики ППК, кандидатов в семейство Нептуна

Комета		T ₀		R _{max} , a.e.	q, a.e.	е	Р, лет	Δ_{min} , a.e.	r _{min} , a.e.	t
C/1989 R1	1989	Авг.	20.3	28.07	1.325	1.00000	_	0.26	28.60	12.1989
C/1992 B1	1992	Март	19.5	28.09	0.500	1.00000		0.46	29.69	03.1992
C/1977 V1	1977	Июль	24.8	28.23	3.603	0.99963	97.3·10 ⁴	0.63	8.14	11.1988
C/1018 P1	1018	Авг.	27.0	28.38	0.620	1.00000	_	0.62	29.14	04.1022
C/1822 J1	1822	Май	6.1	28.43	0.504	1.00000	_	0.83	29.18	10.1821
C/2005 O1	2005	Май	17.4	28.79	3.591	0.92981	366	0.28	0.86	01.600
C/2001 HT50	2003	Июль	9.0	29.02	2.792	0.99761	40·10 ³	0.84	16.34	06.2010
C/2003 H2	2003	Май	18.0	29.23	2.179	0.94298	236	0.50	2.56	09.2224
C/2007 M2	2008	Дек.	8.6	29.24	3.541	0.99923	31.3·10⁴	0.81	1.55	06.2023
C/1996 R3	1995	Июль	20.3	29.30	5.207	1.00000	_	0.72	25.89	06.1995
C/1835 H1	1835	Март	27.7	29.37	2.040	1.00000	_	0.89	23.36	03.1832
C/1315 U1	1315	Окт.	15.1	29.63	1.650	1.00000		0.60	27.20	03.1312
C/1000	574	Март	25.0	29.83	0.730	1.00000	_	0.36	29.14	02.580
C/1900 B1	1900	Апр.	29.4	30.13	1.332	1.00106	_	0.87	27.42	06.1899
C/ 817 C1 C/1802	817	Март	3.0	30.21	1.100	1.00000	_	0.02	24.86	05.839
Q1 C/2006	1802	Сент.	10.4	30.47	1.094	1.00000	_	0.09	27.42	12.1797
E1 C/2003	2007	Янв.	6.7	30.65	6.040	1.00157	_	0.13	24.25	10.2003
T2 C/1973	2003	Нояб.	14.0	31.01		0.99992	34·10 ⁵	0.57	20.63	12.1981
W1	1973	Авг.	9.9	31.03	3.842	1.00064	_	1.21	12.80	07.1983
C/2007 T5	2008	Май	24.2	31.47	4.049	0.91366	321	0.19	2.24	10 1140
C/1858 R1	1858	Окт.	13.3	31.80	1.427	1.00000	_	0.29	28.46	11.1858

Для выявления тесных сближений почти параболических было бы достаточно планетами интегрирование уравнений движения комет на интервале 50 лет, поскольку время прохождения реальных почти параболических комет через планетную систему не превышает 50 лет. Другое дело, короткопериодические кометы, медианное время жизни которых равно 0.45 млн лет. Используемый нами интервал интегрирования 5000 лет, вероятно, не охватывает полностью эпоху, когла могли иметь место тесные сближения короткопериодических комет с Нептуном. Подводя основные итоги, отметим следующее: почти параболические кометы генетически с Нептуном не связаны, короткопериодические кометы в период с -3000 г. по 2000 г. тесных сближений с Нептуном не имели.

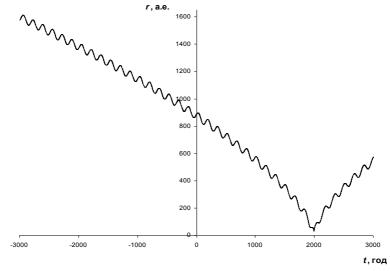


Рис. 2.5. Изменение расстояния между Нептуном и кометой C/1989 R1.

§ 2.3. О кометном семействе Урана

Известно, что афелии орбит короткопериодических комет (КПК, период P<100 лет) концентрируются к орбитам планет-гигантов. Группы комет, объединенных по признаку близости кометных орбит к орбите планеты, принято называть кометными семействами соответствующей родительской планеты. По

данным Всехсвятского (1967), семейство Юпитера составляли 71 комета, семейство Сатурна — 9, семейство Урана — 3, семейство Нептуна — 11 комет. В связи с открытием новых комет к настоящему времени численность кометных семейств значительно увеличилась.

Настоящий параграф посвящен исследованию кометного семейства Урана. Отбор кандидатов семейства Урана проведен из общей совокупности КПК ($N\!=\!435$). Элементы орбит этих комет взяты из каталога (Marsden, Williams, 2005) с дополненными данными за 2006–2007 гг.

Всехсвятский (1967) относил к семейству Урана три кометы: 27Р/1818 D1 Кроммелин, 38Р/1867 B1 Стефан-Отерма и 55Р/1366 U1 Темпель-Туттль. Всехсвятский и Гулиев (1981) расширяют семейство Урана до 5 комет. Дискутируя с Марсденом, предлагается считать, что в 1366 году наблюдалась не комета Темпеля-Туттля, а другой объект, который можно отнести к семейству Урана. В 1457 году наблюдалась не комета Кроммелина, а какая-то другая комета также из семейства Урана. Предположение о существовании еще двух объектов в семействе Урана, сделанное на основании оценок блеска комет, выполненных в 14–15 веках, представляется неубедительным.

В связи с открытием в последние десятилетия новых комет целесообразно вновь проверить наполняемость планетных семейств, семейства TOM числе И комет Дифференциация КПК на планетные семейства проводится на критерия приближенного равенства афелийного расстояния Q кометной орбиты и большой полуоси A орбиты «родительской» планеты. Подвергнем анализу на предмет связи с Ураном кометы с афелийным расстоянием 15 а.е. < Q < 27 а.е. Всего таких комет 22 (табл. 2.7), 16 из которых открыты в последнее десятилетие. Оценим близость кометных орбит к орбите Урана. Для этой цели предварительно используем гелиоцентрического расстояния дальнего кометной орбиты. Величина расстояния R_A до восходящего и R_D до нисходящего узла приведены в табл. 2.7. Для 9 комет узел

орбиты лежит в интервале 4 а.е. < R < 10 а.е. Вряд ли данные кометы можно включать в семейство Урана.

Дополнительную информацию о взаимной кинематике кометной и планетной орбит может дать значение минимального расстояния Δ_{min} между этими орбитами. В табл. 2.7 для всех комет приведена величина Δ_{\min} . Для 14 орбит величина Δ_{\min} составляет от 1.56 а.е. до 12.19 а.е. Таким образом, данные кометы проходили на весьма значительных расстояниях от Урана, поэтому исключим ИХ ИЗ лальнейшего исследования на предмет связи с Ураном. Шесть комет, отмеченных звездочкой (табл. 2.7), проходивших от орбиты Урана на расстояниях 0.30 a.e. $\leq \Delta_{\min} \leq 0.90$ a.e., предварительно будем считать семейством Урана. Подчеркнем, что отбор комет в семейство Урана произведен на основе критериев (Q, R_A , R_D , Δ_{\min}) близости кометных орбит к орбите планеты.

Наличие планетных семейств КПК последователи Лапласа объясняют в рамках теории захвата. Последователи Лагранжа считают, что происхождение КПК есть следствие эруптивных процессов на планетах и их спутниках. Известно, что захват происходит в результате пертурбационного маневра при прохождении кометы через сферу действия планеты. Радиус сферы действия Урана $\rho=0.363$ а.е. Следовательно, минимальное расстояние r_{\min} кометы от планеты должно составлять

$$r_{\min} < \rho = 0.363 \text{ a.e.}$$
 (2.10)

Всехсвятский и Гулиев (1981) считают, что кометы семейства Урана есть продукты выброса со спутников планеты. Поскольку все спутники Урана находятся внутри его сферы действия, то для комет, извергнутых из системы Урана, должно выполняться соотношение (2.10). Таким образом, правдоподобность гипотезы о генетической связи комет с Ураном может быть проверена, если будет известно значение r_{\min} для каждой кометы.

Для определения $r_{\rm min}$ мы выполнили численное интегрирование уравнений движения 22 комет (табл. 2.7) на временном интервале 5000 лет от 2000 г. до - 3000 г. и на

интервале 1000 лет от 2000 г. до 3000 г. Для интегрирования использована программная система ЭПОС, разработанная в ГАО РАН. В данной программной системе применен интегратор Эверхарта с точностью LL = 8, порядком NOR = 15 и планетная эфемерида Стэндиша DE406 на 6000 лет.

В табл. 2.7 приведены минимальные расстояния r_{\min} от комет до Урана. Как видим, тесные сближения с Ураном ($r_{\min} < \rho$) могли иметь три кометы: 55 P C/2006 U7, C/2006 F2.

Таблица 2.7. Кандидаты в кометное семейство Урана

Комета	Название	q, a.e.	e	<i>P</i> , лет	<i>Q</i> , a.e.	$R_{\rm A}$, a.e.	$R_{\rm D}$, a.e.	Δ_{\min} , a.e.	r _{min} , a.e.
P/1997B1	Kobayashi	2.055	0.76075	25.2	15.1	15.04	2.06	4.25	4.85
174 P	Echeclus	5.808	0.45608	34.9	15.5	14.97	5.89	3.85	1.97
27 P	Crommelin	0.735	0.91920	27.4	17.4	12.18	0.75	2.94	1.95
C/2002B1	LINEAR	2.271	0.77091	31.2	17.6	3.40	4.93	11.40	10.18
C/2002 CE10	LINEAR	2.047	0.79147	30.8	17.6	6.88	2.50	7.44	6.56
P/2005 T4	SWAN	0.649	0.93058	28.6	18.1	0.74	4.15	4.49	0.66
C/2004 C1	Larsen	4.350	0.62580	39.6	18.9	4.88	12.86	4.26	3.54
*95 P	Chiron	8.454	0.38311	50.7	19.0	8.60	18.24	0.84	2.16
166 P	NEAT	8.564	0.38441	51.9	19.3	9.10	16.99	1.56	1.96
C/2001T4	NEAT	8.564	0.38442	51.9	19.3	9.10	16.99	1.56	1.99
*C/2006U7	Gibbs	4.428	0.63013	41.4	19.5	4.47	18.72	0.30	0.16
*55 P	Tempel- Tuttle	0.977	0.90553	33.2	19.7	18.21	0.98	0.43	0.08
*C/2006F2	Christensen	4.296	0.65149	43.3	20.4	20.35	4.30	0.87	0.10
*167 P	CINEOS	11.788	0.26919	64.8	20.5	11.89	20.19	0.86	1.64
C/2000 S3	LONEOS	2.662	0.77218	39.9	20.7	3.45	7.44	5.43	5.32
* 38 P	Stephan- Oterma	1.574	0.85998	37.7	20.9	1.57	20.85	0.69	0.68
C/1998 G1	LINEAR	2.133	0.82348	42.0	22.0	7.16	2.67	9.12	9.48
C/2003 E1	NEAT	3.245	0.76363	50.9	24.2	7.00	4.84	7.63	8.68
C/2001 OG108	LONEOS	0.994	0.92529	48.5	25.6	3.25	1.36	12.19	9.65
C/2000 G2	LINEAR	2.717	0.80901	53.6	25.7	5.88	4.22	2.41	2.86
C 1991 L3	Levy	0.983	0.92881	51.0	26.6	1.12	6.23	3.15	1.33

В ходе эволюции афелийное расстояние Q орбиты кометы 55Р Темпель-Туттль уменьшилось на 3 а.е. с 22.7 а.е. до 19.7 а.е. Таким образом, афелий кометной орбиты оказался около орбиты Урана.

Некоторое представление об эволюции орбит этих комет на интервале 5000 лет могут дать данные табл. 2.8, где представлены элементы расчетных орбит на эпоху -3000 года и современные каталожные элементы орбит.

Интересную информацию об изменении афелийного расстояния Q орбиты кометы 55P содержит рис. 2.6а. На фоне осцилляций произошел резкий спад Q. Переброс кометного афелия к орбите Урана вызван тесным сближением кометы с Юпитером в -369 г.

На рис. 2.7а представлено изменение расстояния r кометы 55P от Урана на интервале от -3000 г. до -2000 г. В этом временном интервале комета не приближалась к Урану ближе 4.6 а.е. В 2000—3000 гг. (рис. 2.7б) орбита кометы 55P постепенно приближалась к орбите Урана. В январе 2908 г. должно произойти тесное сближение кометы с Ураном ($r_{\min}=0.08$ а.е., табл. 2.7). Из приведенных данных об эволюции кометы 55P следует, что за последние 5000 лет комета не имела тесных сближений с Ураном, и, следовательно, нет оснований связывать ее происхождение в этот период с системой Урана.

Таблица 2.8. Изменение элементов орбит комет на интервале 5000 лет

Комета	t	q, a.e.	Q, a.e.	e	ω	Ω	i
55P	-3000 г.	0.79	22.7	0.933	97.8	144.2	169.3
334	T_0	0.98	19.7	0.906	172°.5	235°.3	162°.5
C/2006 U7	-3000 г.	4.60	15.6	0.537	307.26	199.9	16.4
C/2000 U /	T_0	4.43	19.5	0.630	12.8	57.8	7.2
C/2006 F2	-3000 г.	4.29	20.2	0.649	174.3	50.3	22.3
C/2006 F2	T_0	4.30	20.4	0.651	181.0	8.3	20.5

Комета С/2006 U7 (рис. 2.6б) неоднократно рассматриваемом интервале сближалась c Юпитером $(t = -2492 \text{ }\Gamma.,$ $r_{\min} = 0.25$ a.e.; t = -2053 r., $r_{\min} = 0.35$ a.e.; $t = -1448 \text{ r.}, r_{\min} = 0.32 \text{ a.e.}; t = -1247 \text{ r.}, r_{\min} = 0.35 \text{ a.e.}; t = -133 \text{ r.},$ $r_{\rm min} = 0.36$ а.е. и т.д.). Возмущения от Юпитера привели к скачкообразному изменению афелийного расстояния (рис. 2.6б) с общей тенденцией к увеличению Q. В период с -3000 г. до 1980 г. афелийное расстояние достигло величины Q = 19.5 а.е. (табл. 2.8). В январе 1981 г. произошло тесное сближение кометы с Ураном (r_{\min} = 0.16 а.е., табл. 2.7). На выходе кометы из действия Урана элементы орбит незначительно $\Delta i = 0^{\circ}.3$, $\Delta \omega = 1^{\circ}.3$, $\Delta \Omega = 0^{\circ}.03$, $\Delta e = 0.008$, $\Delta q = 0.05 \text{ a.e.}, \ \Delta Q = 0.2 \text{ a.e.}$

Комета C/2006 F2 тесных сближений с Юпитером не имела, на интервале 5000 лет ее орбита оставалась довольно стабильной (табл. 2.8, рис. 2.6в). Незначительные изменения элементов орбиты произошли после сближения кометы с Ураном (r_{\min} = 0.10 а.е., табл. 2.7) в декабре 1509 г.

Вряд ли следует давать космогоническую интерпретацию сближений с Ураном комет С/2006 U7 и С/2006 F2. Появление кометных афелиев в зоне орбиты Урана может быть следствием возмущающего действия планет-гигантов. Для определения радиуса орбиты планеты A, вызвавшей возмущение элементов орбиты кометы, можно использовать критерий Радзиевского-Тиссерана (2.9). Элементы орбит комет в нескольких появлениях нам известны только для четырех комет. Вычисления A по (2.9) дали следующие результаты: 27P (A = 3.5, 5.8, 8.6, 5.6 a.e.), 38P (A = 4.8, 5.6 a.e.), 55P (A = 7.5, 8.0, 3.0, 6.2 a.e.) и 95P (A = 9.9, 10.6 a.e.). Среднее значение \overline{A} для 27P \overline{A} = 5.9 a.e., для 38P – \overline{A} = 5.2 a.e., для 55P – \overline{A} = 6.2 а.е., для 95P – \overline{A} = 10.3 а.е. Таким образом, определяющую роль в динамической эволюции рассматриваемых комет (27P, 38P, 55P) играет Юпитер, а на движение кометы 95P существенное влияние оказал Сатурн.

В статье Томанова (1983) показано, что кометы Кроммелин, Темпель-Туттль и Стефан-Отерма генетически с

Ураном не связаны. По результатам вышеизложенного можно считать, что не имеют генетической связи с Ураном 22 кометы.

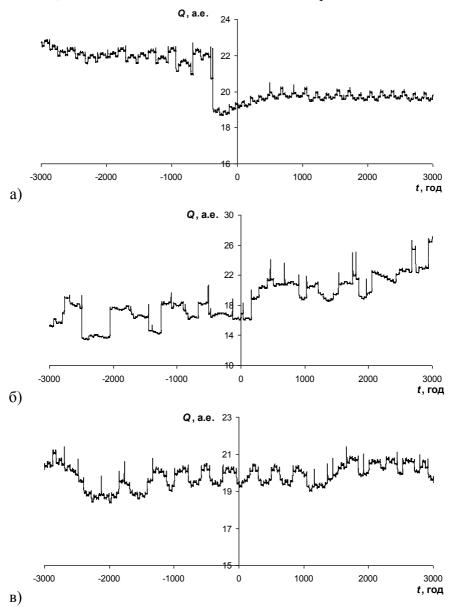
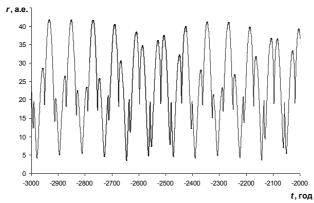


Рис. 2.6. Изменение афелийного расстояния Q орбит комет a) 55P, б) C/2006 U7, в) C/2006 F2



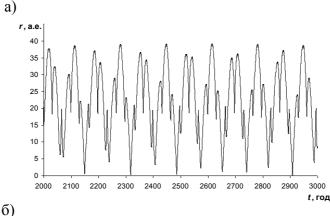


Рис. 2.7. Изменение расстояния r кометы 55Р от Урана

§ 2.4. Кометы и Титан

В работах Дробышевского (1980), Drobyshevski (2000) высказано ряд гипотез:

- $1.\ 3.5-6\ {
 m Tыс.}$ лет назад произошел взрыв Титана.
- 2. Кометные ядра осколки ледяной коры Титана.
- 3. Произошел единовременный выброс ледяных осколков на гелиоцентрические орбиты с последующим образованием семейства короткопериодических и семейства почти параболических комет Сатурна.
- 4. Моменты тесных сближений комет с Сатурном совпадают с моментом взрыва Титана. Автор версии предлагает способ ее проверки: «Обратное интегрирование движения

членов кометного резервуара должно привести к их схождению к системе Сатурна в течение одной довольно ограниченной эпохи в прошлом. Эпоха такого схождения датирует взрыв оболочки Титана. Судя по результатам расчета эволюции орбиты Хирона, взрыв произошел всего 3.5 – 6 тыс. лет назад» (1980). В настоящей статье осуществлена такая проверка выполнено численное интегрирование уравнений движения комет семейства Сатурна на временном интервале 6000 лет. Использовались элементы кометных орбит по каталогу Marsden Williams (2005), дополненные данными 2007 г включительно. Из каталога выбраны кометы с периодом P < 100лет, у которых одновременно и узел, и афелий орбиты находятся на гелиоцентрических расстояниях от 8.6 а.е. до 10.6 а.е. Другими словами, отклонение афелия и узла от орбиты Сатурна не превышает 1.0 а.е. Всего таких комет N = 26. В табл. 2.9 для перигелийное приводится расстояние этих период P, афелийное расстояние эксцентриситет е, гелиоцентрическое расстояние $R_{\rm max}$ удаленного узла, а также величина минимального расстояния Δ_{min} между орбитой кометы и орбитой планеты. Приведенные в табл. 2.9 значения Δ_{min} свидетельствуют о том, что орбиты комет расположены весьма близко от орбиты Сатурна: у всех 26 комет Δ_{min} < 1.0 а.е.

В космогоническом аспекте важнейшей характеристикой является минимальное расстояние r_{\min} кометного ядра от планеты. Для определения r_{\min} мы выполнили численное интегрирование уравнений движения комет на временном интервале от -3000 до 3000 года. Для интегрирования применена программная система ЭПОС, разработанная в ГАО РАН. В этой программной системе используются интегратор Эверхарта и планетная эфемерида Стэндиша DE406.

Значения r_{\min} и эпоха сближения t приведены в табл. 2.9. Для 25 комет r_{\min} меньше радиуса ρ сферы действия Сатурна $r_{\min} < \rho = 0.385$ а.е. Заметим, что такие сближения комет с планетами называются тесными. Тесных сближений с Сатурном не имела комета P/1994 J3 ($r_{\min} = 0.44$ а.е.).

Как видно из табл. 2.9, на интервале 3.5 тыс. лет (от -3000 г. до 500 г.) произошли всего три тесных сближения комет с Сатурном: комета 134Р в сентябре -209 г. приблизилась к Сатурну на минимальное расстояние $r_{\min}=0.19$ а.е., комета Р/2005 ТЗ в марте -2756 г. имела $r_{\min}=0.30$ а.е., а комета Р/2002 Т5 в декабре -2011 г. имела $r_{\min}=0.22$ а.е.

Таблица 2.9. Характеристики короткопериодических комет семейства Сатурна

Комета	Название	q,	е	Р,	Q,	R_{max} ,	Δ_{min} ,	r_{\min} ,	t
		a.e.		лет	_	a.e.	a.e.	a.e.	_
P/2005 T3	Read	6.202	0.17382	21	8.8	8.8	0.86	0.30	032756
P/1994 J3	Shoemaker	2.935	0.50814	15	9.0	8.8	0.75	0.44	01.2327
P/2001 BB50	LINEAR-NEAT	2.347	0.58683	14	9.0	8.9	0.78	0.07	04.1232
P/1997 T3	Lagerkvist- Carsenty	4.240	0.36544	17	9.1	8.6	0.44	0.01	10.1954
P/2005 Y2	McNaught	3.355	0.46628	16	9.2	9.0	0.58	0.03	09.1562
63P	Wild 1	1.961	0.64971	13	9.2	8.9	0.38	0.26	06.2260
P/2007 Q2	Gilmore	1.839	0.67123	13	9.4	8.6	0.69	0.06	12.2507
126P	IRAS	1.703	0.69659	13	9.5	9.5	0.04	0.05	12.1950
P/2005 S2	Skiff	6.398	0.19673	23	9.5	8.8	0.03	0.21	01.1448
P/2005 W3	Kowalski	3.008	0.53051	16	9.8	9.2	0.05	0.12	03.1749
P/1997 C1	P/Gehrels	3.565	0.46882	17	9.9	8.7	0.20	0.11	06.1987
P/2007 A2	Christensen	2.796	0.55838	16	9.9	9.8	0.18	0.33	09.1923
P/1999 D1	P/Hermann	1.655	0.71283	14	9.9	9.7	0.29	0.11	07.2171
134P	Kowal- Vavrova	2.575	0.58719	16	9.9	9.2	0.07	0.19	09209
P/2005 E1	Tubbiolo	4.446	0.38426	19	10.0	9.9	0.16	0.28	11.1937
P/1998 U3	Jager	2.134	0.64821	15	10.0	10.0	0.41	0.02	07.1991
P/2003 F2	NEAT	2.977	0.54221	17	10.0	9.8	0.17	0.11	07.2171
P/2002 T5	LINEAR	3.934	0.43674	19	10.0	8.9	0.57	0.22	122011
P/1999 V1	Catalina	2.944	0.55051	17	10.2	10.1	0.43	0.01	11.1313
P/1997 G1	P/Montani	4.214	0.41660	19	10.2	9.2	0.11	0.33	10.2603
P/2007 C2	Catalina	3.779	0.46231	19	10.2	10.3	0.53	0.12	08.2574
P/2004 V3	Siding Spring	3.938	0.44622	19	10.3	8.8	0.52	0.09	09.566
P/2004 A1	LONEOS	5.463	0.30820	22	10.3	10.1	0.36	0.03	07.1992
P/2002 EJ57	LINEAR	2.636	0.59406	17	10.4	10.0	0.36	0.10	03.1964
P/2005 XA54	LONEOS-Hill	1.778	0.71015	15	10.5	9.6	0.23	0.13	10.818
P/2001 T3	NEAT	2.506	0.61503	17	10.5	10.5	0.75	0.28	07.2513

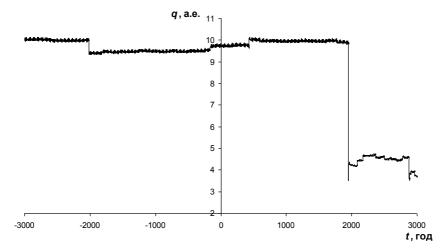


Рис. 2.8. Изменение перигелийного расстояния q кометы Р/1997 Т3

В период от 500 г. до 1500 г. пять комет имели тесные сближения с Сатурном. В период с 1500 г. по 2000 г. сближались с Сатурном 10 комет. После 2000 г. пройдут через сферу действия Сатурна 8 комет.

Таким образом, если пребывание комет в сфере действия Сатурна отождествлять с их «рождением» в результате взрыва Титана, то процесс рождения комет следует признать перманентным. Но, согласно Дробышевскому (1980, 2000), выброс комет из системы Сатурна произошел единовременно.

Наличие семейства короткопериодических комет Сатурна (табл. 2.9) быть следствием возмущений. может Проиллюстрируем примерах. Ha рис. ЭТО ДВУХ на представлено изменение перигелийного расстояния q кометы Р/1997 ТЗ на интервале 6 тыс. лет. В течение 5 тыс. лет величина q сохранялась в пределах 9.5 - 10 а.е. Затем в результате тесного сближения кометы с Сатурном в 1954 г. произошло резкое уменьшение перигелийного расстояния до значения q = 4.6 a.e. Существенно, что после сближения с Сатурном афелийное расстояние Q уменьшилось с 19.8 а.е. до 9.8 а.е. Приобретенное значение Q = 9.8 а.е. дало основание считать комету P/1997 T3 принадлежащей семейству Сатурна.

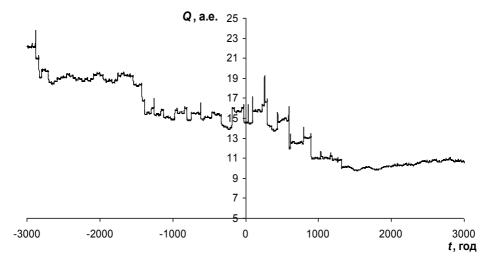


Рис. 2.9. Изменение афелийного расстояния Q кометы P/1999 V1

На рис. 2.9 показано изменение афелийного расстояния Q кометы P/1999 V1. В период с -3000 г. до 1000 г. афелийное расстояние уменьшилось с $Q_1=21.5$ а.е. до $Q_2=11$ а.е. После тесного сближения с Сатурном в 1313 г. установилось $Q\approx 10$ а.е., и комета перешла в семейство Сатурна.

По данным Коноплевой (1980), существует повышенная концентрация орбит почти параболических комет (ППК, P > 200 лет) к орбитам Юпитера и Сатурна. Понятие планетных семейств ППК Юпитера и Сатурна введено на основе анализа распределения минимальных расстояний Δ_{\min} между кометными и планетными орбитами. Дробышевский (1980, 2000) дает этим семействам космогоническую интерпретацию, полагая, что семейство ППК Сатурна образовалось в результате взрыва Титана 3.5-6 тыс. лет тому назад. Дробышевский ошибочно полагает, что при интегрировании уравнений движения комет можно получить эпоху тесных сближений комет с Сатурном, совпадающую с эпохой взрыва Титана.

Таблица 2.10. Характеристики ППК семейства Сатурна

Комета		T ₀		q, a.e.	ω	Ω	i	R _{max} , a.e.	Δ_{\min} , a.e.	r _{min} , a.e.	t
C/2003 T3	29.0	Апр.	2004	1.481	43°.8	347°.1	50°.4	10.7	0.004	3.96	07.2007
C/2004 F2	26.7	Дек.		1.431		248.3	105.0	10.4	0.02	0.35	07.2001
C/1975 X1	3.9	Янв.		0.864		281.5	94.0	9.4	0.02	8.06	11.1975
C/1999 F1		Февр.				20.0	92.0	9.2	0.03		02.2003
C/1989 Q1		Нояб.					90.1	10.0	0.03	2.65	10.1987
C/1798 X1	1.4	Янв.		0.775		252.3	137.7	8.2	0.03	7.80	07.1798
C/2001 U6	8.7	Авг.	2002	4.406	85.7	115.2	107.3	9.5	0.03	6.93	06.2001
C/1844 N1	17.8	Окт.	1844	0.855	211.3	33.8	131.4	11.8	0.03	7.91	10.1843
C/2002 Q5	19.2	Нояб.				33.7	149.2	7.9	0.03	1.61	12.1999
C/2004 L2	15.1	Нояб.	2005	3.779	257.3	99.2	62.5	9.6	0.04	8.41	07.2007
C/1824 N1	12.0	Июль	1824	0.592	334.1	236.8	125.4	11.8	0.04	2.64	10.1822
C/2007 N3	10.7	Янв.	2009	1.209	136.9	338.5	178.4	9.0	0.05	7.98	03.2009
C/1889 G1	11.3	Июнь	1889	2.256	236.1	312.2	163.9	10.2	0.05	5.80	09.1888
C/1774 P1	15.9	Авг.	1774	1.429	136.5	184.0	83.0	10.4	0.05	4.34	11.1772
C/ 568 O1	27.7	Авг.	568	0.870	34.9	301.8	4.0	9.7	0.06	8.49	09.574
C/1532 R1	18.8	Окт.	1532	0.519	24.5	93.8	32.6	11.5	0.06	8.43	02.1532
C/2007 M1	11.1	Авг.	2008	7.474	52.6	326.8	139.7	9.3	0.06	5.68	01.2012
C/1997 BA6	27.6	Нояб.	1999	3.436	285.9	317.7	72.7	9.5	0.08	10.50	01.2000
C/1948 T1	4.4	Сент.	1947	3.261	73.5	122.1	155.1	9.1	0.08	3.83	04.1946
C/1942 C1	30.8	Апр.	1942	1.445	223.4	340.9	79.5	10.6	0.08	9.50	06.1942
C/1943 W1	12.3	Янв.	1944	0.874	33.1	58.6	136.2	10.8	0.09	7.81	10.1943
C/1972 X1	18.9	Дек.	1972	4.861	267.2	314.9	113.1	10.2	0.09	7.60	04.1972
C/1998 Q1	29.5	Июнь	1998	1.578	134.7	159.8	32.3	10.5	0.10	4.62	07.2000
C/1942 X1	6.7	Февр.	1943	1.354	39.8	100.8	19.7	11.3	0.10	5.85	03.1941
C/1618 Q1	17.6	Авг.		0.513		298.8	21.5	11.1	0.10	0.90	03.1622
C/1983 J2	19.0	Янв.		1.416		119.6	152.2	8.9	0.11	8.29	04.1983
C/2005 L2	14.5	Июль				155.9	152.8	10.8	0.11	3.32	03.2007
C/1860 H1	6.1			1.307		10.8	48.2	10.5	0.13	1.62	01.1863
C/1902 R1		Нояб.				50.7	156.4	7.3	0.13	9.54	11.1902
C/2001 RX14	18.7			2.058		14.2	30.6	8.6	0.13	6.02	01.2000
C/2003 WT42	10.8	Апр.		5.191	92.5	48.5	31.4	10.9	0.14	5.07	02.2005
C/1896 R1		Июль			41.1	152.4	88.4	9.3	0.15	9.66	05.1896
C/1930 L1	10.4	Май		1.153		279.3	97.1	10.3	0.15	8.61	07.1930
C/1533 M1		Июнь			21.4	125.4	149.6	7.4	0.15	8.75	09.1532
C/2005 YW	7.8	Дек.		1.993		302.2	40.5	9.3	0.16	6.49	04.2006
C/2003 G3	5.3	Апр.		0.017		87.6	169.7	7.7	0.16	2.37	11.2004
C/2007 JA21		Нояб.			93.8	65.5	89.8	11.5	0.17	3.85	07.2002
C/1240 B1	21.6	Янв.		0.668		135.1	75.3	10.9	0.17	8.35	08.1241
C/1999 N4	23.7	Май		5.505	90.4	345.9	156.9	11.0	0.17	2.59	01.1996
C/1593 O1	19.1	Июль	1593	0.089	12.1	169.9	87.9	8.1	0.18	8.95	12.1592

Для проверки этой концепции мы отобрали из кометного каталога орбиты, один из узлов которых отстоит от орбиты Сатурна не далее, чем на 2.5 а.е., и вычислили минимальное расстояние Δ_{\min} этих орбит от орбиты Сатурна. В табл. 2.10 представлены 40 комет, пути которых пролегают ближе всего к орбите Сатурна, их минимальное расстояние от орбиты Сатурна заключено в пределах 0.004 а.е. $<\Delta_{\min}<0.2$ а.е.

Далее выполнено численное интегрирование уравнений движения комет с использованием программной системы ЭПОС с целью определения минимального расстояния r_{\min} кометы от планеты и эпоху сближения t. Величины r_{\min} и t приведены в девятой и десятой колонках табл. 2.10. Значения r_{\min} показывают, что 38 комет не приближались к Сатурну ближе, чем на 1.0 а.е. Лишь комета C/2004 F2 прошла на расстоянии $r_{\min} = 0.35$ а.е. от Сатурна. Заметим, что при этом элементы орбиты практически не изменились. Таким образом, нет оснований говорить о генетической связи ППК с Сатурном.

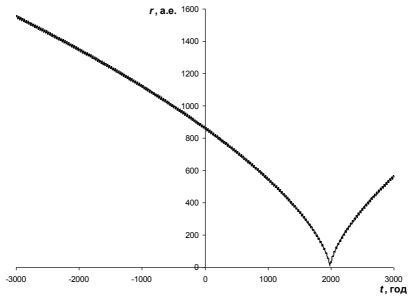


Рис. 2.10. Изменение расстояния r между Сатурном и кометой С/1983 J2

Из сравнения величин T_0 и t (вторая и десятая колонки табл. 2.10) легко видеть, что они различаются не более чем на 3–4 года. Это означает, что минимальное расстояние r_{min} кометы от планеты имело место в эпоху прохождения кометы через перигелий. Очевидно, что 3.5–6 тыс. лет назад почти параболические кометы находились от планетной системы на огромных расстояниях. На рис. 2.10 приведено изменение расстояния r кометы C/1983 J2 от Сатурна. В -3000 г. комета находилась от Сатурна на расстоянии $r \approx 1600$ а.е.

Таким образом, почти параболические кометы не могли быть выброшены из системы Сатурна 3.5–6 тыс. лет тому назад. Гипотеза о сближении ППК с Сатурном 3.5–6 тыс. лет назад – нонсенс: в ту эпоху параболические кометы находились от Солнца на огромных расстояниях.

§ 2.5. Кометы галлеевского типа

Короткопериодические кометы (КПК, период P < 200 лет) принято делить (Kresaks, 1994) на две группы: кометы семейства Юпитера (КСЮ, P < 20 лет) и кометы галлеевского типа (КГТ, 20 лет < P < 200 лет). К 2005 г. в каталоге Marsden, Williams (2005) и в кометных циркулярах Центрального Бюро Астрономических телеграмм (http://www.cfa.harvard.edu/iau/cbat.html) за 2006-2007 гг. всего содержится 461 КПК, в том числе КГТ -67.

В последние годы стала весьма актуальной проблема происхождения КГТ. Многие исследователи (Levison, Duncan 1997; Ипатов, 2000; Fernandez и др., 2002) считают, что происхождение комплекса короткопериодических комет с прямыми движениями можно объяснить их притоком из пояса Койпера. Захват на орбиты галлеевского типа изучали Bailey, Emel`ynenko (1996), Emel`ynenko, Bailey (1997), Levison и др. (2001), Napier и др. (2004). Захват из трансплутоновой зоны на орбиты кентавров (перигелийное расстояние 5 а.е.< q < 28 а.е) рассматривали Irvin и др. (1995), Jewitt и др. (1996), Emel`ynenko (1999), Ipatov, Mather (2003), Emel`ynenko и др. (2005).

Захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа рассматривал Бирюков (2007, 2008). Основная проблема этого

исследования — попытка согласовать теоретическое и наблюдаемое число КГТ. Получено, что на орбитах галлеевского типа должно существовать более 3000 комет, в то время как, по данным Бирюкова, в каталоге Marsden, Williams (2005) имеются сведения только лишь о 23 кометах. В цитируемых выше работах по космогонии КГТ не рассматривается соответствие теоретических и наблюдаемых элементов кометных орбит.

Ниже мы рассмотрим распределение элементов орбит 67 некоторые закономерности данном В комплексе. Размер и форму орбит определяют перигелийное q, афелийное Q расстояния, эксцентриситет e. В табл. 2.11 дано числа N кометных орбит распределение ПО перигелийного расстояния q, гелиоцентрического расстояния узлов R, афелийного расстояния Q. Для перигелиев и афелиев приведена объемная плотность $\sigma = 3N/4\pi(r_2^3 - r_1^3)$ в шаровых слоях радиусами от r_1 до r_2 .

Таблица 2.11 Распределение перигелиев, узлов и афелиев

q, a.e.	N	σ , (a.e.) ⁻³	<i>R</i> , a.e.	N	ρ , (a.e.) ⁻²	<i>Q</i> , a.e.	N	$\sigma \cdot 10^4$, (a.e.) ⁻³
0-1	15	3.58	0-2	31	2.47	8-10	2	9.78
1-2	17	0.58	2-4	20	0.53	10-15	9	9.05
2-3	11	0.14	4-6	25	0.40	15-20	12	6.19
3-4	5	0.032	6-8	16	0.18	20-25	6	1.88
4-5	9	0.035	8-10	10	0.09	25-30	6	1.26
5-6	4	0.010	10-12	4	0.03	30-35	12	1.80
6-7	3	0.006	12-14	4	0.02	35-40	6	0.68
7-8	0	0	14-16	5	0.03	40-45	3	0.26
8-9	2	0.002	16-18	4	0.02	45-50	4	0.28
9-10	0	0	18-20	6	0.03	50-55	2	0.12
10-11	0	0	20-22	6	0.02	55-60	4	0.19
11-12	1	0.0006	22-48	3	0.0005	60-65	1	0.04

Для узлов дана плотность $\rho = N/\pi (r_2^2 - r_1^2)$ на круговых кольцах плоскости эклиптики радиусами от r_1 до r_2 . Узлы и перигелии концентрируются в близкой околосолнечной области. Максимум плотности узлов $\rho = 2.47$ (a.e.)⁻² приходится на круг радиусом R = 2 а.e. Максимум плотности перигелиев

 $\sigma = 3.58$ (a.e.)⁻³ находится в сфере радиусом R = 1 a.e. Характер распределения узлов и перигелиев идентичен: с ростом гелиоцентрического расстояния идет резкий спад числа и перигелиев и узлов. Минимальное перигелийного расстояния q = 0.19 а.е. имеет комета C/1917 F1, максимальное значение q = 11.788 а.е. принадлежит комете афелийного Минимальное расстояния значение Q = 8.812 а.е. имеет комета P/2005 T3, максимальное значение Q = 64.87 а.е. принадлежит комете C/1937 D1. Повышенная концентрация афелиев имеет место на гелиоцентрических расстояниях 8 а.е. < Q < 20 а.е. Плотность узлов ρ на этом интервале гелиоцентрических расстояний низкая (табл. 2.11). Таким образом, характер распределения афелиев и узлов различен. В табл. 2.12 дано распределение орбит КГТ по эксцентриситету. Как видим, большинство орбит представляют собой довольно вытянутые эллипсы: 43 орбиты, или 64.2 % имеют e > 0.8. Для сравнения 80 % комет семейства Юпитера имеют эксцентриситет 0.3 < e < 0.7. Таким образом, по величине эксцентриситета орбиты КГТ занимают некое промежуточное положение между комплексом почти параболических комет и кометами семейства Юпитера. Ориентацию в пространстве плоскостей кометных орбит обычно характеризуют величиной долготы восходящего узла Ω и наклона i. Задачу можно решить комплексно, если использовать эклиптические координаты λ_n , кометных орбит, поскольку $\lambda_{\pi} = \Omega - 90^{\circ}$, полюсов β_{π} $\beta_{\pi} = 90 - i$. В табл. 2.13 приводится распределение полюсов по равновеликим площадкам небесной сферы. равновероятном распределении полюсов на каждой площадке должно было содержаться 1.86±0.45 полюсов. Однако на 16 площадках полюсы вообще отсутствуют, 11 площадок содержат по 1-2 полюса, на 9 площадках находится от 3 до 11 полюсов. В сегменте с $\beta_{\pi} > 41.8^{\circ}$, на который приходится 1/6 площади небесной сферы, расположены полюса 40 комет, или 60 % от общего числа КГТ. Всего комет с прямыми движениями ($i < 90^{\circ}$,

 $eta_{_{I\!I}} > 0^\circ$) 52, или 77.6 % от общей совокупности КГТ. Обратные движения ($i > 90^\circ$, $eta_{_{I\!I}} < 0^\circ$) имеют 15 комет. Как видно из табл. 2.13, 45 орбит КГТ имеют долготу полюса $180^\circ < \lambda_{_{I\!I}} < 360^\circ$. Это означает, что у этих комет долгота восходящего узла составляет $270^\circ < \Omega < 90^\circ$. Восходящие узлы 22 комет расположены на долготах $90^\circ < \Omega < 270^\circ$. Двукратное преобладание восходящих узлов орбит КГТ на одной половине эклиптики — явление явно не случайное.

Используя метод наименьших квадратов, можно определить, что афелии концентрируются к плоскости $\Omega=103.9^\circ,\ i=5.7^\circ.$

Таблица 2.12. Распределение по эксцентриситету

e	N
0-0.1	0
0.1-0.2	2
0.2-0.3	1
0.3-0.4	3
0.4-0.5	4
0.5-0.6	2
0.6-0.7	5
0.7-0.8	7
0.8-0.9	15
0.9-1.0	28

Таблица 2.13. Распределение полюсов орбит КГТ

		$\lambda_{_{II}}$							
	0°-	60°-	120°-	180°-	240°-	300°-	Всего		
$oldsymbol{eta}_{\scriptscriptstyle \Pi}$	60°	120°	180°	240°	300°	360°			
+90.0°+41.8°	5	7	3	9	5	11	40		
+41.8°+19.5°	-	-	-	-	3	2	5		
+19.5°0°	-	-	2	-	4	1	7		
0.0°19.5°	-	-	-	1	1	-	2		
-19.5°41.8°	2	-	-	-	1	-	3		
-41.8°90.0°	1	-	2	4	2	1	10		
Всего	8	7	7	14	16	15	67		

Как видно из табл. 2.14, в распределении афелиев по долготе λ_Q существует минимум около 90° и максимум около $\lambda_Q=240^\circ$. По методу Натансона (1923) нетрудно определить, что афелии концентрируются к точке $\lambda_Q=242.87^\circ$, $\beta_Q=-31.69^\circ$. Степень концентрации к этой точке довольно высокая — r=0.286.

Из табл. 2.14, где приводится распределение афелийных направлений, видно, что большинство афелиев (54 из 67) расположены на широтах -41.8° < $\beta_{\it Q}$ <19.5°. Преобладают афелии в южном эклиптическом полушарии, где находится 43, или 64.2 % афелиев.

Таблица 2.14. Распределение афелиев по небесной сфере

		λ_{arrho}						
$eta_{\scriptscriptstyle \mathcal{Q}}$	0°-60°	60°-	120°-	180°-	240°-	300°-	Всего	
P_Q		120°	180°	240°	300°	360°		
90.0°41.8°	-	-	-	-	-	1	1	
41.8°19.5°	1	-	1	2	2	-	6	
19.5°0°	3	1	1	4	5	3	17	
0.0°19.5°	2	1	5	3	7	3	21	
-19.5°	1	1	5	5	2	2	16	
41.8°	1	1	3	3	_	_	10	
-41.8°	2	_	1	1	_	2	6	
90.0°	_		1	1		_		
Всего	9	3	13	15	16	11	67	

С целью анализа эволюции орбит КГТ в работе Калиничевой и Томанова (2008) выполнено численное интегрирование уравнений движения комет на интервале 5000 лет с учетом гравитационного воздействия всех больших планет. Интегрирование осуществлялось с помощью программной системы ЭПОС, разработанной в ГАО РАН. Используя результаты этой работы, определена разность величин элементов кометных орбит в эпоху 2000 г. минус в эпоху -3000 г.: Δe изменение эксцентриситета, Δq — изменение перигелийного

расстояния, ΔQ – изменение афелийного расстояния, Δa – изменение большой полуоси, Δi – изменение наклона. Данные об изменении размеров и формы орбит КГТ содержатся в табл. 2.15, где представлены осредненные значения изменений элементов кометных орбит. Анализируя табл. 2.15, можно преимущественные направления определить динамической эволюции КГТ с -3000 г. по 2000 г. У ~70 % орбит перигелийное расстояние q уменьшилось, у ~60 % увеличилось афелийное расстояние Q и у ~70 % увеличился эксцентриситет орбит. При этом большая полуось а у 37 из 67 комет увеличилась, но среднее изменение Δa для всех КГТ – величина отрицательная, поскольку рост a в среднем меньше по модулю, чем уменьшение а за рассматриваемый период. Таким образом, за последние 5000 лет орбиты КГТ преимущественно эволюционировали в сторону уменьшения перигелийного расстояния, некоторого увеличения афелийного расстояния и эксцентриситета. Аргумент перигелия ω за рассматриваемый период преимущественно увеличивался, а долгота восходящего узла Ω – уменьшалась (табл. 2.15).

особенности орбит Главные эволюции короткопериодических (Bailey, комет определяются Emel`yanenko, долговременными возмущениями 1996) (исследуемый интервал не позволяет рассматривать фактор), комплексными взаимодействиями между резонансами в среднем движении и тесными сближениями с планетами.

Таблица 2.15. Эволюция размеров и формы орбит КГТ

Δq	N	$\Delta \overline{q}$, a.e.	ΔQ	N	$\Delta \overline{Q}$, a.e.	Δa	N	$\Delta \overline{a}$, a.e.
$\Delta q > 0$	20	+0.16	$\Delta Q > 0$	39	+2.4	$\Delta a > 0$	36	+1.3
$\Delta q < 0$	47	-0.36	$\Delta Q < 0$	28	-5.5	$\Delta a < 0$	31	-2.6
Δe	N	$\Delta \bar{e}$	$\Delta \omega$	N	$\Delta \overline{\omega}$	$\Delta\Omega$	N	$\Delta\overline{\Omega}$
$\Delta e > 0$	48	+0.030	$\Delta\omega > 0$	43	33.5°	$\Delta\Omega > 0$	19	31.9°
$\Delta e < 0$	19	-0.041	$\Delta\omega$ < 0	24	-23.2°	$\Delta\Omega$ < 0	48	-30.5°

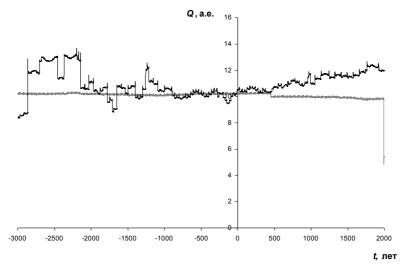


Рис. 2.11. Изменение афелийного расстояния комет P/2004 A1 (черная линия) и P/2002 T6 (серая линия).

тесные Рассмотрим сближения КГТ планетамигигантами. Сближение будем считать тесным, если комета прошла через сферу действия планеты. В частности, для Юпитера радиус сферы действия $\rho_1 = 0.32$ а.е., радиус сферы действия Сатурна $\rho_s = 0.36$ а.е. В табл. 2.16 представлены самые близкие тесные сближения КГТ с Юпитером и Сатурном. В отличие от комет семейства Юпитера (P < 20 лет), на динамику которых определяющее влияние оказывает Юпитер, тесные сближения КГТ часто происходят и планетами-гигантами. В результате тесного сближения элементы орбит комет могут существенно измениться. Причем изменения могут происходить как в сторону приращения, так и в обратном направлении. Так, афелийное расстояние кометы Р/2004 А1 (рис. 2.10) до тесного сближения с Сатурном В (табл. 2.16) менялось очень слабо, а затем резко уменьшилось. Афелийное расстояние кометы Р/2002 Т6 (рис. 2.10), напротив, в результате тесных сближений (табл. 2.16) резко менялось неоднократно.

Таблица 2.16. Тесные сближения КГТ с Юпитером (J) и Сатурном (S)

Комета	r_{min} , a.e.	Год
20D	0.332 (J)	-2065
35P	0.128 (S)	-1555
38P	0.328 (S)	-2075
55P	0.082 (J)	-369
	0.337(S)	1630
95P	0.191 (S)	-1018
161P	0.231 (J)	1257
174P	0.136 (S)	188
177P	0.346 (J)	-2151
P/1994 N2	0.078 (J)	-639
P/1997 B1	0.301 (J)	-2994
P/2002 T6	0.139 (J)	-2861
	0.118 (S)	-275
P/2003 QX29	0.202 (J)	-2269
P/2004 A1	0.031 (S)	1992
P/2004 DO29	0.184 (J)	133
	0.396 (S)	1467
P/2005 S2	0.205 (S)	1448
P/2005 T3	0.216 (S)	-2551
P/2005 T4	0.109 (J)	925
C/1991 L3	0.080 (S)	-1498
C/2000 G2	0.181 (J)	-2851
C/2001 M10	0.120 (J)	-2559
C/2002 A1	0.167 (J)	-2613
C/2003 E1	0.286 (J)	550
	0.351 (S)	-2089
C/2003 F1	0.183 (J)	-864
C/2003 W1	0.277 (J)	-1814
C/2004 C1	0.247 (J)	-120
C/2005 W2	0.144 (J)	-2290
	0.135 (S)	-2776
C/2006 U7	0.147 (J)	-2765

Для определения радиуса A орбиты планеты, вызывавшей возмущение элементов орбиты кометы, можно использовать критерий Радзиевского-Тиссерана (2.9). В кометном каталоге (Marsden, Williams, 2005) элементы орбит в двух и более появлениях приводятся для 12 комет. Значения A по формуле (2.9) вычислены для комет: 12P (A = 4.23 a.e., 6.27 a.e., среднее значение \overline{A} = 5.25 a.e.), 13P (A = 5.33, 5.59 a.e. \overline{A} = 5.46a.e.), 20D

 $(A = 5.41 \text{ a.e.}), 23P (A = 4.91, 6.60 \text{ a.e.}), \overline{A} = 5.78 \text{ a.e.}), 27P$ $(A = 3.51, 5.82, 8.57, 5.61 \text{ a.e.}, \overline{A} = 5.88 \text{ a.e.}), 35P (A = 5.66 \text{ a.e.}),$ 38P (A = 4.77, 5.62 a.e., $\overline{A} = 5.20$ a.e.), 55P (A = 7.49, 8.02, 2.95, 6.21 a.e., $\overline{A} = 6.17$ a.e.), 109P (A = 5.77, 3.65, 7.05, 5.55 a.e., 122P (A = 5.80)a.e.). Таким $\overline{A} = 5.51$ a.e.). определяющую роль на динамическую эволюцию этих 10 комет оказал Юпитер. На движение кометы 95P (A = 9.88 a.e., 10.61 а.е., $\overline{A} = 10.25$ а.е.) существенное влияние мог оказать Сатурн. Для кометы 1Р Галлея, наблюдавшейся в 30 появлениях, значение A варьируется в широких пределах: A = 1.28 a.e. в появлениях 1909 г. и 1982 г., и A = 40.43 а.е. в появлениях 1222 г. и 1301 г., среднее значение $\overline{A} = 8.07$ а.е.

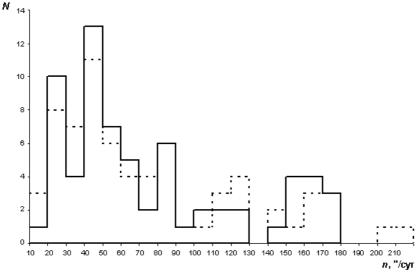


Рис. 2.12. Распределение КГТ по среднесуточному движению

Гравитационное воздействие планет-гигантов на динамику орбит комет может иметь также резонансный характер. На рис. 2.12 представлено распределение КГТ по среднесуточному движению в настоящем времени (сплошная линия) и для -3000 г. (пунктирная линия). Характер распределения крайне неравномерен — существуют области сгущения и разрежения, соответствующие резонансам первых и нулевых порядков с планетами-гигантами. Причем неравномерность с течением

времени усиливается. Например, увеличено число комет со средним движением $n \approx 150''$ — резонанс 1/2 с Юпитером. Кроме того, изменение элементов орбит комет также может быть связано со средним движением. На рис. 2.13 представлена зависимость Δa от современного среднего движения КГТ. Сильнее всего меняется большая полуось у комет с малым средним движением — 20'' < n < 30''. А для комет с $n \approx 50''$ большая полуось меняется незначительно.

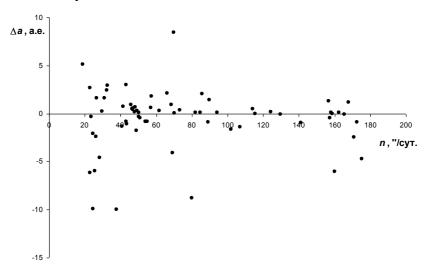


Рис. 2.13. Зависимость изменения большой полуоси Δa от среднесуточного лвижения n КГТ

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о существенном влиянии на динамическую эволюцию КГТ планет-гигантов, которое осуществляется через тесные сближения и в результате резонансных взаимодействий. Если преимущественное направление эволюции орбит КГТ в прошлом не менялось, то источник их должен находиться за орбитой Урана – кентавры, транснептуновые объекты.

§ 2.6. Юпитер и происхождение короткопериодических комет

В работе Edgeworth (1949), посвященной космогонии Солнечной системы, проблеме происхождения комет отводится две фразы: «Можно предположить, что эта внешняя область занята большим количеством сравнительно сгустков, и она фактически является обширным резервуаром потенциальных комет. Время от времени один из этих сгустков отклоняется от своего положения, входит во внутренние области Солнечной системы и становится видимой кометой». Kuiper (1951) считал, что на расстоянии 40-50 а.е. от Солнца в первичной лапласовской туманности могли сконденсироваться кометные ядра. Данную транснептуновую зону теперь называют поясом Койпера. В литературе по проблеме происхождения комет высказывается мнение о генетической связи современной объектами пояса Койпера. кометной системы с большинстве работ такая связь либо декларируется, либо приводятся косвенные данные, подтверждающие, по мнению авторов, такую связь. Так, например, в работе Fernandez (1980) считается. что образование короткопериодических связано с влиянием гравитационных возмущений на тела пояса Койпера со стороны Нептуна. В данной работе приводятся ссылки на статьи Whipple (1972), Everhart (1972), где эта обсуждается несколько c иных Аналитический подход используется в работе Luu (1996), где автор цитирует Duncan, Quinn, Tremaine (1988) и Holman, Wisdom (1993), предполагая, что транснептуновый пояс есть источник короткопериодических комет, и тела пояса могут перебрасываться на короткопериодические орбиты.

Проблемы динамической эволюции и связи комет с объектами пояса Койпера обсуждаются в работе Horner, Evans (2001), где считается, что динамическая эволюция кометных орбит происходит под влиянием Юпитера, а не планет, наиболее афелию близких К перигелию ИЛИ кометы. Авторами предложена классификационная схема. основанная на вычисленной использовании константы Тиссерана, ПО отношению к Юпитеру, и рассматривается положение афелия, опять же по отношению к Юпитеру. В работе Weissman (1995) считается, что источником короткопериодических комет семейства Юпитера является транснептуновая область от 34 до 45 а.е. Такой вывод автор делает, основываясь на результатах работ Everhart (1972a, 1974), Kuiper (1951).

цитированных работах основном используется В обработка статистики перигелиев или афелиев. также вычисляются константы Тиссерана по отношению к планетамгигантам. В качестве альтернативных методов исследования применялось моделирование (Everhart, 1972б), основанное на Монте-Карло. Исследование эволюции короткопериодических комет на основе численного интегрирования уравнений движения реальных комет проводили Беляев и др. (1986), Казимирчак-Полонская (1967), Carussi и др. (1986), Tancredi, Ricman (1992), Кузьмичев, Томанов, Горшкова В проблеме происхождения короткопериодических (2004).комет (КПК) в настоящее время наиболее актуальным можно считать вопрос: «Являются ли КПК пришельцами из пояса Койпера?» Для анализа проблемы происхождения комет будем использовать 274 короткопериодические кометы (КПК, период P<200 лет) по каталогу Marsden, Williams (2003).

Структура комплекса короткопериодических комет. На рис. 2.14 представлено распределение КПК по перигелийному расстоянию q. Распределение близко к максвелловскому. Максимальное перигелийное расстояние имелось у кометы C/2001 T4 NEAT (q = 8.57 a. e.), минимальное – у кометы 96Р/1986 J2 Мачхолц 1 (q = 0.127 a. e.). Максимум кометных перигелиев наблюдается на гелиоцентрических расстояниях 1.1-2.1 а. е. Радзиевский (1981), Калиничева (2002) показали, что наблюдаемое распределение перигелиев совпадает с истинным, наблюдательной селекции. зависит OT табл. 2.17 распределение КПК по эксцентриситету. представлено Максимум распределения приходится на значение е = 0.58. Минимальное значение эксцентриситета (e = 0.135104) имеет

орбита кометы P/1999 DN3 Корлевич-Юрич, а максимальное значение (e = 0.993121) принадлежит комете C/1917 F1 Меллиш.

Таблица 2.17. Распределение орбит КПК по эксцентриситету

e	N
0.1-0.2	12
0.2-0.3	13
0.3-0.4	31
0.4-0.5	36
0.5-0.6	70
0.6-0.7	47
0.7-0.8	24
0.8-0.9	16
0.9-1.0	25

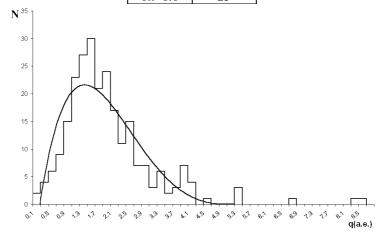


Рис. 2.14. Распределение КПК по перигелийному расстоянию

Афелии КПК большом лежат В диапазоне гелиоцентрических расстояний: минимальную величину Q =133P/1979 OW7 комета Эльст-Пизарро, имеет максимальное значение Q = 104.89 а.е. принадлежит комете 153Р/1661 С1 Икеа-Жанга. На рис. 2.15 дано распределение по Q. Как видно, афелии резко концентрируются к орбите Юпитера. На интервале от $Q_1 = 4.5$ а.е. до $Q_2 = 6.5$ а.е. находится N = 162афелия, или 59.1% от всех афелиев КПК. Плотность афелиев на этом интервале $\sigma = N/\pi Q_2^2 - Q_1^2 = 2.34$ (a.e.)⁻². Около орбиты Сатурна в интервале от 8.5 а.е. до 10.5 а.е. плотность афелиев резко падает и составляет 0.21 (a.e.)⁻².

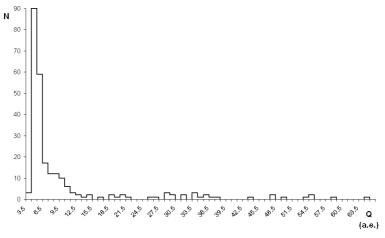


Рис.2.15. Распределение КПК по афелийному расстоянию орбит.

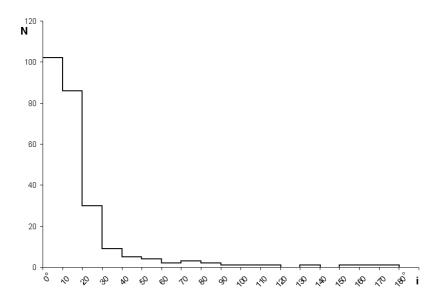


Рис. 2.16. Распределение КПК по углу наклона орбит

На расстояниях более 15 а.е. плотность $\sigma \to 0$, где на

каждом интервале $\Delta Q = 1$.а.е. располагается всего лишь по 1–3 афелия. За пределами планетной системы (R>40 а.е.) находится только 10 афелиев (рис. 2.15).

Пространственную ориентацию плоскостей кометных орбит определяют два угла: наклон к эклиптике і и долгота восходящего распределения узла δ). Для восходящего характерны обычные флуктуации vзла относительно среднего уровня. На рис. 2.16 дано распределение КПК по і. Абсолютное большинство КПК обладают прямыми движениями: наклон $i < 30^\circ$ имеют 235 орбит, или 85.8%. Десять комет ретроградные: 1P/-239, $i = 163^{\circ}.5$; 55P/1366 U1, $i = 162^{\circ}.2$; 109P/-68 Q1, $i = 113^{\circ}.9$; C/1827 M1, $i = 136^{\circ}.5$; P/1983 V1, $i = 136^{\circ}.5$ 95°.7; C/1998 G1, $i = 109^{\circ}.7$; C/2000 D2, $i = 157^{\circ}.0$; C/2000 G2, $i = 157^{\circ}.0$ =170°.5; C/2001 W2, $i = 115^{\circ}.9$; C/2002 K4, $i = 94^{\circ}.1$.

Распределение комет по средним движениям, или эквивалентно, по большим полуосям орбит, характеризуется ярко выраженной неравномерностью (рис. 2.16).

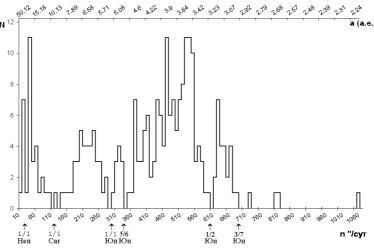


Рис. 2.17. Распределение КПК по среднему суточному движению

Как показывает гистограмма, интервалы среднего движения, в которых концентрируется значительное число комет, чередуются с интервалами разрежения или даже полного отсутствия комет (люки). Связь между люками и возмущающим

влиянием притяжения планет, прежде всего Юпитера, вытекает из того факта, что люки (рис. 2.17) локализуются вблизи значений среднего движения, которые соизмеримы со средним движением возмущающей планеты. Среднее движение кометы п называется соизмеримым со средним движением планеты n_1 , если

$$n/n_1 = p/q, (2.11)$$

где p и q взаимно простые числа. При выполнении условия (2.11), определенные конфигурации кометы и планеты повторяются через каждые q оборотов кометы и p оборотов планеты. Условие (2.11) называется также резонансным, а соответствующие орбиты – резонансными.

Ha рис. 2.17 значения среднего движения, главным соизмеримостям соответствующие Юпитером, c Сатурном и Нептуном, отмечены стрелками. Наиболее заметные люки вблизи значений *n*, равных 299".1, 358".9, 598".2 и 697".9, соответствуют соизмеримостям 1/1, 5/6, 1/2, 3/7 со средним Юпитера $(n_1=299''.1)$. Видны движением люки с Нептуном и Сатурном. соизмеримостей 1/1 естественным образом подразделяют КПК на шесть групп (рис. 2.17, табл. 2.18).

В табл. 2.18 даны: N - численность комет каждой группы, \overline{Q} , \overline{i} , \overline{H}_{10} , \overline{R} , \overline{q} , \overline{C} - средние значения афелийного расстояния, наклона, абсолютной звездной величины, гелиоцентрического расстояния узлов, расположенных в районе афелиев; перигелийного расстояния, постоянной Тиссерана. В табл. 2.19 для каждой группы комет приведено число перигелиев N_q , число узлов N_R и число афелиев N_Q в функции гелиоцентрического расстояния.

Наиболее многочисленной (N=147) является IV группа (350'' < n < 610''). Среднее значение афелийного расстояния $\overline{Q}=5.6$. а.е. (табл. 2.18). На гелиоцентрических расстояниях от 4 а.е. до 6 а.е. расположены 122 узла и 114 афелиев (табл. 2.19). Кометы с такими орбитами традиционно называют семейством Юпитера. Особенностью данных орбит является концентрация

перигелиев и узлов на гелиоцентрических расстояниях от 1 а.е. до 3 а.е. ($N_q=124,\ N_R=132,\ {\rm табл.}\ 2.19$). На середине этого интервала расположена орбита Марса, но Марс вряд ли мог вызвать указанное скопление перигелиев и узлов в связи с его малой массой. Среднее значение абсолютной звездной величины комет IV группы составляет $\overline{H}_{10}=7^{\rm m}.36$. Среднее значение постоянной Тиссерана $\overline{C}=2.80$.

Таблица 2.18. Группировки комет по среднему суточному движению

Группа	п ("/сут)	$N \mid \overline{Q}$, (a.e.)		$ar{m{i}}$	\overline{H}_{10}	\overline{R} , (a.e.)	\overline{C}
I	10–130	40	36.09	60°.46	5 ^m .87	12.89	1.07
II	140–290	45	10.09	18.17	5.66	8.04	2.45
III	300–340	11	7.76	10.52	7.73	5.90	2.58
IV	350–610	147	5.58	12.27	7.36	4.76	2.81
V	620–700	25	5.03	13.70	9.71	4.03	2.80
VI	730–1080	6	4.63	10.87	10.4	3.78	2.90

У комет V группы афелии и узлы лежат ближе к Солнцу (табл. 2.18 и 2.19), чем у комет IV группы. Равенство значений постоянной Тиссерана комет IV и V групп может свидетельствовать об их единой генетике. На этом основании, видимо, можно сравнивать возраст комет этих групп.

Кометы VI группы еще более слабые — $\overline{H}_{10}=10^{\rm m}.4$, а их афелии лежат глубоко внутри орбиты Юпитера. В VI группу входят всего лишь шесть комет: 2P/1786 В1 Энке, 107P/1949 W1 Вильсон-Харрингтон, D/1766 G1 Хельфенцридер, 26P/1808 С1 Григг-Скъеллеруп, P/2001 WF2 LONEOS, P/2002 О5 NEAT. Перигелии комет 107P/1949 W1 и P/2001 WF2 лежат почти точно на орбите Земли — q=1.004 а.е. и q=0.976 а.е., у P/2002 О5 q=1.174 а.е., перигелий кометы 26P/1808 С1 близок к Венере — q=0.732 а.е., вблизи орбиты Меркурия расположен

перигелий кометы 2P/1786 B1 (q=0.346 a.e.) и перигелий кометы D/1766 G1 (q=0.406 a.e.).

Таблица 2.19. Классификация КПК по среднему суточному движению.

q, R, Q		I		II			III		IV		V			VI				
(a.e.)	N_q	N_R	N_Q															
0-1.0	15	12								6	3		8	8		4	3	
1.0-2.0	10	14		13	13		6	5		81	73		16	15		2	4	
2.0-3.0	7	6		18	17		3	4		43	59		1	8			1	
3.0-4.0	1	5		5	5		1	2		17	36			4	1		-	
4.0-5.0	3	8		7	10		1	3			55	28		12	12		4	6
5.0-6.0	1	3		2	7			4			67	86		3	12			
6.0–7.0	1	1			6			2	2		1	29						
7.0-8.0	-	5			7	5		1	5			4						
8.0-9.0	2	2			10	8		1	4									
9.0–10.0		2			7	10												
10.0–11.0		2			5	12												
11.0-12.0		-			2	4												
12.0–14.0		2			-	3												
14.0–16.0		4			1	3												
16.0–18.0		4	2															
18.0–20.0		2	3															
20.0–22.0		4	2															
22.0– 105.0		4	33															

Малочисленная (N=11) группа III отделена от комет семейства Юпитера люком (n=358".9, резонанс с Юпитером 5/6). Перигелии комет III группы располагаются на гелиоцентрических расстояниях 1 а.е.÷ 3 а.е., афелии — на расстояниях 6 а.е.÷ 8 а.е. Кометы III группы более слабые по блеску ($\overline{H}_{10}=7^{\rm m}.73$), чем кометы IV группы, орбиты имеют более пологий наклон к эклиптике ($\bar{i}=10^{\circ}.52$).

II группа комет ограничена люками (рис. 2.17) с одной стороны при n=120".5 (соизмеримость 1/1 со средним движением Сатурна), с другой стороны при n=299".1

(соизмеримость 1/1 со средним движением Юпитера). Афелии и узлы имеют некоторое сгущение к орбите Сатурна (табл. 2.18, 2.19). Кометы этой группы самые яркие ($\overline{H}_{10} = 5^{\text{m}}.66$) из всего комплекса КПК, они ярче почти параболических комет (ППК, P > 200 лет), для которых, согласно Аллену (1977), медианная абсолютная звездная величина составляет 7^{m} . У комет группы II увеличивается средний наклон к эклиптике - $\overline{i} = 18^{\circ}.17$.

Кометы I группы имеют еще более крутые наклоны к эклиптике $-\bar{i} = 60^{\circ}.5$. Увеличивается сходство статистических характеристических комет группы системы почти параболических комет (ППК): перигелии концентрируются в земной группы (табл. 2.19), планет отсутствуют группировки афелиев к орбитам планет, перигелии 85 комет (группы I и II) концентрируются к точке $\lambda = 259^{\circ}.2$, $\beta = 14^{\circ}.4$. долгота которой близка к долготе апекса Солнца ($\lambda_A = 270^{\circ}$, $\beta_{A} = 53.^{0}5$), а широта смещена к эклиптике. Таким образом, можно предполагать, что кометы групп I и II являются некой промежуточной подгруппой между почти параболическими и короткопериодическими кометами.

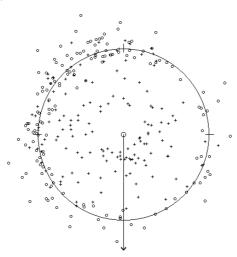


Рис. 2.18. Распределение афелиев КПК (кружки) и нисходящих узлов (крестики)

Доминантой системы КПК, по-видимому, являются кометы, выделенные люками (рис.2.17) при n = 358".9 и n =598".2. Афелии этих комет (*N*=147) на рис. 2.18 изображены кружочками, нисходящие узлы - крестиком, окружность орбита Юпитера. Рисунок наглядно иллюстрирует известный факт: афелии КПК расположены около орбиты Юпитера. Менее известен другой факт: афелии неравномерно распределены по долготе. На долготах от 135° до 315° сосредоточено 109 афелиев, на интервале $315^{\circ} < \lambda < 135^{\circ}$ оказалось всего лишь 38 афелиев. Вероятность p того, что такое распределение афелиев есть случайный результат $p=1-\varphi$ $\alpha/\sigma=5\cdot 10^{-9}$, где φ – интеграл вероятности, $\alpha = 109/147 - 1/2$ – отклонение от наивероятнейшего значения, $\sigma = \sqrt{0.5 \cdot 0.5 / 147}$ – стандарт случайной величины (Агекян, 1972). Феномен исключительно высокой концентрации афелиев на одной половине орбиты Юпитера интерпретирован (Томанов, 1989) в рамках теории (Everhart, 1972б) захвата комет Юпитером. В этом случае один из узлов кометной орбиты является «местом рождения» кометы. Нисходящие узлы лежат практически в зоне повышенной концентрации афелиев (рис. 2.18).

Подводя итоги вышеизложенному, можно сделать вывод: орбиты КПК, вычисленные для первого появления, кинематически связаны с Юпитером.

Эволюция орбит КПК на интервале времени 5000 лет. С целью проверки генетической связи короткопериодических комет с поясом Койпера проведено исследование движения КПК от момента прохождения кометой перигелия орбиты в первом появлении до -3000 г. Для использовалась компьютерная программа, написанная на языке Visual Fortran, расчетная модель которой построена на основе общей теории задачи 10 тел. Тела – планеты Солнечной системы брались в точечном приближении. Массой кометного тела в сравнении с массами планет пренебрегалось. не построении расчетной модели учитывались эффекты. В приближениях негравитационные указанных

проекции ускорения кометного тела в декартовой системе координат, введенной относительно плоскости эклиптики с центром в Солнце в рамках задачи N-тел, представлены в виде дифференциальных уравнений второго порядка. Уравнения были модифицированы с использованием преобразования Энке, что позволило получать на каждом шаге интегрирования координаты для оскулирующей орбиты и оскулирующие элементы, минимизировав накопление расчетной погрешности. Для вычисления координат возмущающих использовалась планетная эфемерида DE406 (Standish et al., 1997). В качестве численного метода, реализующего процесс интегрирования, взят метод Эверхарта с точностью в 11м знаке.

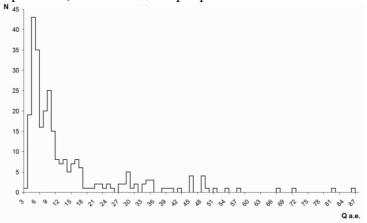


Рис. 2.19. Распределение КПК по афелийному расстоянию орбит в -3000 г.

Основные результаты численного интегрирования опубликованы в работе Кузьмичева, Томанова, Горшковой (2004), где для каждой из 274 комет представлено в виде графиков изменение за 5000 лет афелийного расстояния, гелиоцентрического расстояния одного из узлов, наклона, широты афелия, аргумента перигелия и долготы восходящего узла. Аналогичные исследования проводились многими авторами. Так, в монографии Carussi et al (1986) приводятся результаты интегрирования 132 КПК на интервале 420 лет, в работе Тапсгеdi и Ricman (1992) рассчитана орбитальная эволюция 163 короткопериодических комет на интервале 2000

лет. Наши результаты довольно близки к результатам, полученным в данных работах.

Распределение всех КПК по афелийному расстоянию на эпоху -3000 г. представлено на гистограмме (рис. 2.19), откуда легко видеть, что 229 комет имели афелийное расстояние Q<23 а.е. Таким образом, 229 комет, или 83.5% от общего числа комет, двигаются внутри пояса Койпера, не касаясь последнего. Следовательно, нет оснований подозревать данные кометы в том, что за последние 5000 лет они могли «родиться» в поясе Койпера (позже -3000 г.).

Исключим из числа «подозреваемых» 229 комет, следует проверить «родственную» связь с поясом Койпера 45 комет с афелийными расстояниями 23 а.е. < Q < 87 а.е. На данном интервале афелии распределены случайным образом, какойлибо повышенной концентрации афелиев на расстояниях пояса Койпера не обнаруживается (рис. 2.19).

В числе отмеченных 45 комет имеются 14 комет, испытавших мощное воздействие планет-гигантов на формирование их орбит. В табл. 2.20. приведены основные параметры данных орбит: период P, афелийное Q, перигелийное q расстояния, эксцентриситет e, наклон i, гелиоцентрические расстояния восходящего R_A и нисходящего R_D узлов, долгота λ_A и широта афелия β_A , постоянная Тиссерана. В первой строчке даны элементы орбит на эпоху -3000 г., во второй — по каталогу Marsden, Williams (2003).

Некоторые кометы сближались с Юпитером многократно. Так, комета 51Р/1953Р1 Харрингтон за 5000 лет более 30 раз проходила вблизи Юпитера на расстояниях r<0.8 а.е.; зарегистрированы 13 сближений ее с Юпитером на расстояниях r<0.5 а.е. Некоторые кометы имели тесные сближения с Сатурном, Ураном и Нептуном. В последней колонке табл. 2.20 указаны обстоятельства того сближения с Юпитером, которое привело к наиболее существенному изменению орбиты: дата сближения, минимальное расстояние r кометы от Юпитера в а.е. Если в -3000 г. указанные 14 комет имели средний период \overline{P} =101г., то после захвата кометы оказались на орбитах с

периодами от 5.3 до 11.4 лет, \overline{P} =7 лет (вторая строчка для каждой кометы в табл. 2.20).

Таблица 2.20. Кометы, имевшие особо тесные сближения с Юпитером

Обозначение	P	Q	q	e	i	R_A	R_D	$\lambda_{_{A}}$	$\beta_{\scriptscriptstyle A}$	C	Дата	r
o o o o sina ne i i i i	годы	a.e.	a.e.	Ü		a.e.	a.e.	, A	P A)	дата	a.e.
31P/1929B1	90.0	35.3	4.826	0.759	4.9	34.7	4.5	222.2	-0.5	2.55	14.01.	0.022
31F/1929D1	6.4	4.8	2.090	0.395	3.7	2.1	4.8	304.8	0.1	9.32	1547	0.022
43P/1924Y1	126.5	45.4	5.020	0.801	3.0	10.4	8.0	64.7	2.9	2.29	23.11.	0.005
43F/192411	7.6	5.3	2.428	0.372	23.7	5.3	2.4	261.6	0.1	8.38	1841	0.003
51P/1953P1	151.0	51.6	5.075	0.821	5.2	5.1	50.7	238.7	0.5	2.16	05.02.	0.005
31P/1933P1	7.0	5.6	1.694	0.536	11.6	4.4	1.8	176.1	7.3	8.80	-2069	0.005
57P/1941O1	110.3	40.8	5.200	0.774	7.0	35.0	5.3	140.2	-2.1	2.41	21.03.	0.004
3717194101	5.6	4.9	1.305	0.584	3.3	1.7	2.6	119.6	-3.1	10.10	526	0.004
74P/1967EU	134.0	47.2	5.213	0.801	3.7	5.4	36.7	159.5	1.4	2.26	25.12.	0.205
/4P/190/EU	8.5	4.8	3.546	0.148	6.7	4.1	4.1	348.4	-6.7	7.95	938	
75P/1975C1	142.7	49.1	5.548	0.797	1.7	7.9	13.5	332.7	-1.6	2.25	22.07.	0.018
/3F/19/3C1	6.2	5.2	1.568	0.537	5.4	5.1	1.6	263.7	-0.9	9.43	1256	1256
79P/1945G1	59.0	25.5	4.842	0.681	6.4	7.5	8.8	198.6	6.3	3.02	03.11.	0.020
/9F/1943G1	5.3	4.8	1.243	0.588	6.9	4.4	1.3	20.9	2.5	10.41	1812	0.020
86P/1980G1	141.3	48.9	5.350	0.803	2.6	33.9	5.6	239.3	1.2	2.24	24.11.	0.030
80F/1980G1	6.9	4.9	2.286	0.368	15.5	4.9	2.3	72.1	-0.2	8.92	1634	0.030
94P/1984E1	119.8	42.6	6.003	0.753	8.9	14.4	8.3	359.0	-8.4	2.40	31.05.	0.250
94P/1964E1	6.4	4.8	2.125	0.383	6.3	2.9	2.9	343.8	-6.3	9.34	1772	0.230
10CD/1077T1	88.1	34.6	4.988	0.748	15.8	25.3	5.3	111.6	-7.6	2.55	01.10.	0.062
106P/1977T1	7.5	6.0	1.628	0.574	20.5	1.6	5.9	225.8	2.1	8.40	299	0.063
121D/1000D1	78.2	27.5	9.065	0.504	5.0	23.7	9.6	232.2	2.7	2.98	03.01.	0.242
131P/1990R1	6.6	4.9	2.083	0.406	7.1	4.9	2.1	209.9	-1.1	9.19	1837	0.243
D/10000D54	51.5	23.4	4.293	0.689	4.1	13.1	5.0	315.0	-3.2	3.15	05.08.	0.022
P/1998QP54	8.6	6.5	1.882	0.552	17.7	1.9	5.6	190.8	-8.8	7.74	-182	0.033
P/2000Y3	68.3	28.0	5.377	0.678	8.4	20.3	5.8	160.7	4.8	2.88	21.09.	0.057
	11.4	6.1	4.048	0.201	2.3	4.8	4.9	263.9	-2.3	6.73	1998	0.057
D/2001TL/00	55.8	24.2	4.962	0.660	6.5	21.6	5.1	173.8	-2.3	3.10	04.02.	0.005
P/2001TU80	7.0	5.4	1.933	0.472	6.6	1.9	5.4	284.3	0.6	8.81	-326	0.003

В работах Томанова (1980, 1981) показано, что для захвата кометы Юпитером на короткопериодическую орбиту необходимо, чтобы догоняющая Юпитер комета вошла в полусферу влияния планеты, расположенную за планетной орбитой. Everhart (19726, 1976) методом Монте-Карло

исследовал миллионы фиктивных комет на больших интервалах времени и показал, что КПК образуются в результате захвата Юпитером не только из числа долгопериодических, но даже из начальных парабол, если их перигелийные расстояния равны 4—6 а.е., а наклон — не более 9°. Теоретические прогнозы полностью подтверждаются наблюдениями: реальные кометы в эпоху -3000 г. (табл. 2.20) имели малые наклоны — среднее значение \bar{i} =6°, а среднее значение перигелийного расстояния составляло $\bar{q}=5.4$ а.е. Итак, комета имеет шанс быть захваченной в семейство Юпитера, если ее орбита удовлетворяет следующему критерию:

$$i < 9^{\circ}, \ q = 4-6 \text{ a.e.}$$
 (2.12)

Из общего ансамбля кометных орбит Юпитер в соответствии с критерием (2.12) селективно формирует группу комет, которые принято называть семейством Юпитера – группа IV табл. 2.18. Все 14 комет в эпоху -3000 г. находились бы в группе I, а после захвата данные кометы перемещаются в группу IV (табл. 2.18). Таким образом, объяснить происхождение КПК можно было бы без привлечения гипотезы об их «рождении» в транснептуновой зоне.

В заключение кратко об эволюции 31 кометы из числа 45, имеющих Q>23 а.е. За 5000 лет элементы орбит этих комет претерпели небольшие изменения. Так, для кометы 1Р/-239 К1 Галлея $\Delta Q=0.70$ а.е., $\Delta q=0.04$ а.е., $\Delta e=0.003$, $\Delta i=3^{\circ}.4$, $\lambda_{A}=3^{\circ}.7$, $\Delta C=0.02$. Среднее значение афелийного расстояния 31 орбиты в -3000 г. составило $\overline{Q}=42.2$ а.е., в настоящую эпоху — $\overline{Q}=39.7$ а.е.

Причина относительной стабильности данных кометных орбит в течение пяти тысячелетий заключается в том, что кометы исключительно редко могут пройти вблизи планетгигантов. Дело в том, что ни одна из 31 орбиты не удовлетворяет критерию (2.12): все орбиты имеют наклон $i>16^\circ$. Тем не менее, некоторые кометы все-таки имели сближения с планетами. Так, комета С/1999 Е1 прошла через сферу действия Урана 09.12.1073 г. на минимальном расстоянии от планеты r=0.045

- а.е., при этом афелийное расстояние кометной орбиты уменьшилось с 29.6 а.е. до 28.7 а.е., а наклон увеличился с 45°.8 до 46°.9. Комета С/2000 G2 прошла 29.05.1843 на минимальном расстоянии r=0.205 а.е. от Юпитера. Афелийное расстояние уменьшилось с 29.6 а.е. до 25.7 а.е., наклон увеличился с 162° до 170°.5. Кратко резюмируем вышеизложенное.
- 1. Комплекс короткопериодических комет имеет дискретную структуру: в распределении больших полуосей орбиты КПК люками разделены на шесть групп. Резонансные движения комет определяются возмущениями планет-гигантов. Доминирующая роль в формировании кометных орбит принадлежит Юпитеру.
- 2. По результатам численного интегрирования уравнений движения КПК на интервале 5000 лет не удалось установить генетическую связь комет с транснептуновой зоной. Из 274 короткопериодических комет на эпоху -3000 г. 229 орбит имели афелийное расстояние Q<23 а.е. Таким образом, эти кометы через пояс Койпера не проходили. Афелийное расстояние 23 а.е. Q< 87 а.е. имели 45 комет, из них 31 комета сохраняла афелий в указанном интервале Q в течение 5000 лет, а 14 комет были захвачены Юпитером на орбиты с афелийным расстоянием от 4.8 а.е. до 6.5 а.е.

ГЛАВА 3. КОМЕТЫ И ГИПОТЕТИЧЕСКИЕ ПЛАНЕТЫ

§ 3.1. Гипотетические трансплутоновые планеты

Известно, что афелии короткопериодических комет (КПК, P < 100 лет) располагаются около орбит планетгигантов. Исходя из критерия близости кометных афелиев к орбите соответствующей планеты комплектуются семейства КПК Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Впервые Schuette (1949) обратил внимание на семейство из пяти (109Р/1862 О1, G1. C/1917 F1. C/1889 M1. C/1907 35P/1939 долгопериодических комет (ДПК, период P > 100лет). афелийные расстояния Q которых заключены в интервале 47.6 а.е. ÷ 59.0 а.е. «Родительской» планетой этого семейства Шютте считал Плутон. Чеботарев (1972) высказал сомнение в том, что указанное семейство комет связано с Плутоном, и предположил, что семейство принадлежит неизвестной десятой планете с большой полуосью A = 53.7 a.e. Позднее Schütte (1965) одну группу из 11 афелиями, указал еще комет c трансплутоновой расположенными В зоне 73.1 а.е. $\leq Q \leq 102.5$ а.е. По мнению Чеботарева (1972), данное семейство связано с гипотетической транснептуновой планетой, имеющей большую полуось A = 100 а.е. Значение A планеты принято равным среднему афелийному расстоянию Q кометных орбит.

Гулиев и Дадашов (1989) предполагают, что пять комет с афелийными расстояниями от 47.7 а.е. до 59.2 а.е. связаны с планетой, имеющей большую полуось A=55 а.е., наклон орбиты к эклиптике $i=30^\circ$, долготу восходящего узла $\Omega=272^\circ$. По мнению этих же авторов, для шести комет

(99 а.е. < Q < 116 а.е.) существует «родоначальная» планета с орбитальными характеристиками $i = 30^\circ$, $\Omega = 341^\circ$, A = 110 а.е. Авторы отмечают, что они исходили из предположения близости афелийных расстояний кометных орбит к большой полуоси орбиты «родоначальной» планеты.

Для определения большой полуоси орбиты Томанов Кузьмин «родительской» планеты И (1989)использовали критерий Радзиевского-Тиссерана и сделали вывод о возможности существования трансплутоновой планеты на гелиоцентрических расстояниях 55-60 а.е. в плоскости эклиптики.

Гулиев (1987), анализируя данные о короткопериодических кометах, которые обычно относят к семейству Нептуна, предположил существование неизвестной планеты ($i = 30^\circ$, $\Omega = 287^\circ$) в зоне Нептун-Плутон.

В основу гипотезы Радзиевского (1980, 1985а, б, 1986, 1987, 1990) положен постулат о наличии на окраине Солнечной системы двух массивных планет X_1 ($P \approx 2000$ лет, $i = 140^\circ$, $\Omega = 75^{\circ}$, $m = 50m_{\oplus}$), X_2 (P = 1800 πeτ, $i = 60^{\circ}$, $\Omega = 270^{\circ}$). Oбе планеты двигаются около галактической плоскости. Параметры планет получены статистическими методами и имеют точность ~10°. Показано (Томанов и Калиничева, 1999, 2000), что при обработке наблюдательного материала Радзиевским получены ошибочные результаты. Полагая, что перигелии (афелии) орбит почти параболических комет расположены около плоскости орбиты «материнской» планеты, ошибочно сделан вывод об их концентрации к галактическому экватору. Фактически на галактических широтах $-5^{\circ} < b < +15^{\circ}$ имеет место дефицит перигелиев. Не соответствует действительности заключение о концентрации повышенной полюсов орбит ППК галактическим полюсам.

Науменко (1982), анализируя данные об орбитах 22 комет, пришел к выводу о существовании четырех неизвестных планет с A, равным 77, 123, 201, 285 а.е. Гулиев (1994) предсказывает существование планеты, двигающейся по орбите с A=165 а.е.,

 $i=37^\circ$. По мнению Anderson (1987), существует неизвестная планета, орбита которой либо сильно вытянута и имеет A=57-107 а.е., либо почти перпендикулярна эклиптике. Исследуя долгопериодические кометы, Matese и др. (1999) предположили, что на орбиты этих комет влияет далекая планета с массой $m\approx 3m_{IOn}$, большой полуосью $A\approx 25000$ а.е. и наклоном $i=90^\circ$. Эти выводы были сделаны на основе статистики 20 кометных орбит.

§ 3.2. Плоскость планетной орбиты

Если комета вышла на гелиоцентрическую орбиту из сферы влияния планеты, то линия апсид кометной орбиты будет составлять малый угол с плоскостью орбитального движения планеты. Другими словами, как показал еще Гаусс (1813), перигелии (афелии) кометных орбит будут располагаться около планетной орбиты. Данный тезис подтверждается наблюдаемым распределением перигелиев КПК по эклиптической широте β . Перигелии концентрируются К эклиптике: поясе 11°.5< β <+11°.5, составляющем 20% площади небесной сферы, содержится 79% (217) от общего числа перигелиев (274). По современным представлениям источник КПК (пояс Койпера, планеты-гиганты) лежит в плоскости эклиптики.

Полагая, что и перигелии ППК также концентрируются к плоскости орбиты материнской планеты, будем искать эту плоскость двумя методами. Поиск такой плоскости проводили Гулиев и Дадашов (1985), подсчитывая количество перигелиев в 10-ти градусных окрестностях плоскостей с заданным наклоном к эклиптике i и долготой восходящего узла на эклиптике Ω . Используя шаг 10° по i и Ω , эти авторы определили плоскость, около которой наибольшее число перигелиев: $\Omega = 100^{\circ}$, $i = 90^{\circ}$. Мы провели аналогичные расчеты с шагом 1° по i и Ω и нашли, что максимальное число перигелиев располагается в зоне $\pm 10^{\circ}$ около плоскости: $\Omega = 91^{\circ}$, $i = 84^{\circ}$. Если использовать только кометы с прямым движением (наклон $i < 90^{\circ}$, N = 374), то в результате получаем плоскость Π_1 : $i = 90^{\circ}.0$; $\Omega = 90^{\circ}.0$. Ниже

плоскость Π_1 подвергнем тестированию на предмет наличия в ней планеты X. Данная плоскость перпендикулярна эклиптике и проходит через точки солнцестояний. Заметим, что, согласно Андерсону (1987), орбита гипотетической планеты перпендикулярна эклиптике.

Второй способ определения плоскости, к которой концентрируются кометные перигелии, основан на методе наименьших квадратов. Данная методика, примененная ко всем 794 кометам, дала плоскость: $i=55^{\circ}.2$; $\Omega=281^{\circ}.8$, которая составляет с плоскостью Галактики угол $5^{\circ}.0$. Согласно Радзиевскому (1987), орбита планеты X может находиться в галактической плоскости. Таким образом, есть основание продолжить поиск планеты X в галактической плоскости Π_2 : $i=60^{\circ}.2$: $\Omega=269^{\circ}.3$.

Если происхождение комет связано с планетами (захват, эрупция), то плоскости кометных орбит должны лежать около плоскости «родительской» планеты (Всехсвятский, словами. орбит Другими полюса кометных должны располагаться около полюса орбиты «родительской» планеты. Таким образом, можно предположить, что области повышенной концентрации кометных полюсов на небесной сфере могут указывать на полюс орбиты «родительской» планеты. В табл. 3.1 дано распределение кометных полюсов по 144 равновеликим площадкам небесной При равновероятном сферы. распределении на каждой площадке должно располагаться 5.50 ± 0.24 полюса. Фактически на 100 площадках содержится от 3 до 8 полюсов. Имеются четыре площадки, где полюса отсутствуют. На 19 площадок приходится по 1-2 полюса. Есть 11 площадок, где число полюсов от 10 до 15. Видимо, координаты центров этих площадок можно было рассматривать как координаты полюсов орбит гипотетических планет.

Из табл. 3.1 видно, что наблюдается минимум полюсов на долготах 240°< λ_{Π} <300° ($\overline{\lambda}_{\Pi}$ =270°) и на широтах -19°.5 < β_{Π} < +9°.6 ($\overline{\beta}_{\Pi}$ \approx -5°). Это означает, что существует дефицит кометных орбит около плоскости Ω = 0°, i = 95°. В табл. 3.1 небесная сфера разделена на 12 равновеликих поясов,

параллельных эклиптике. При равновероятном распределении в каждом поясе должно было содержаться 66 ± 3.93 полюсов. Значимые максимумы имеют место около полюсов эклиптики. На широтах $+56^{\circ}.4 < \beta_{\Pi} \leq 90^{\circ}.0$ расположено 83 полюса, а на широтах $-90^{\circ}.0 \leq \beta_{\Pi} < -56^{\circ}.4$ оказалось 95 полюсов. Таким образом, около полюсов эклиптики число кометных полюсов более чем на треть превосходит среднее значение. Этот результат дает основание предполагать, что «родительская» планета может находиться в плоскости эклиптики.

Таблица 3.1. Распределение полюсов кометных орбит по равновеликим площадкам небесной сферы

	λ_Π												
β_{Π}	0°-	30°-	60°-	90°-	120°-	150°-	180°-	210°-	240°-	270°	300°-	330°-	Dagna
	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°	Всего
90°.0+56°.4	11	2	6	14	9	8	6	7	1	6	8	5	83
56°.4+41°.8	6	5	5	6	5	6	4	2	8	4	1	3	55
41°.8+30°.0	1	5	9	6	6	4	5	4	6	9	4	5	64
30°.0+19°.5	5	6	1	1	4	6	9	6	3	3	9	6	59
-19°.5+9°.6	8	6	0	4	6	2	7	8	6	2	5	5	59
+9°.60°.0	5	1	1	5	2	5	9	8	4	0	5	8	53
0°.09°.6	4	5	4	2	4	6	9	7	3	7	1	6	58
-9°.619°.5	2	5	4	5	11	6	4	7	2	1	7	0	54
19°.530°.0	6	5	6	3	9	8	3	4	4	4	6	0	58
30°.041°.8	5	10	11	7	7	5	8	9	3	5	5	2	77
41°.856°.4	10	7	7	6	4	4	4	9	7	5	10	4	77
56°.490°.0	10	5	14	2	5	8	8	7	5	6	10	15	95
Всего	73	62	68	61	72	68	76	78	52	52	71	59	792

Найдем теперь «интегрированный» полюс кометных орбит. Рассматривая полюса кометных орбит как материальные точки, расположенные на сфере единичного радиуса, можно найти координаты L, B их центра инерции из системы уравнений (Натансон, 1923):

$$NR\cos L\cos B = \sum \cos \lambda_{\Pi_i} \cos \beta_{\Pi_i},$$

$$NR\sin L\cos B = \sum \sin \lambda_{\Pi_i} \cos \beta_{\Pi_i},$$

$$NR\sin B = \sum \sin \beta_{\Pi_i}.$$
(3.1)

где λ_n , β_n — эклиптические координаты полюсов, r — расстояние от центра сферы до центра инерции полюсов, N – число орбит. Точка с эклиптическими координатами L, B есть которая представляет собой плоскости, некое «средневзвешенное» всех плоскостей кометных орбит, или, другими словами, плоскость, к которой концентрируются плоскости кометных орбит. Восходящий узел этой плоскости на $\Omega = L + 90^{\circ}$, наклон $i = 90^{\circ} - B$. Решая систему уравнений (3.1), мы получили для прямых орбит плоскость: $i = 4^{\circ}.4$; $\Omega = 323^{\circ}.4$, для обратных – $i = 173^{\circ}.5$; $\Omega = 219^{\circ}.0$. На результата ОНЖОМ предполагать, основе ЭТОГО «родительская» планета ППК находится в плоскости эклиптики. образом, целесообразно подвергнуть эклиптики (обозначим Π_3) тестированию на предмет наличия в ней планеты X.

Итак, есть основания искать планету X в трех плоскостях: Π_1 – плоскость перпендикулярная эклиптике и проходящая через точки солнцестояний, Π_2 – плоскость Галактики и Π_3 – плоскость эклиптики. Применяя кометы в качестве инструмента для поиска планет в трех плоскостях, очевидно, следует использовать соответственно три системы координат. В каталоге Marsden, Willliams (2003) элементы кометных орбит даны в эклиптической системе координат (основная плоскость Π_3). Элементы орбит в галактической системе координат (основная плоскость Π_2) мы получили по методике, изложенной в каталоге Радзиевского и Томанова (1985). Элементы кометных орбит в Π_1 вычислены координатной системе ПО формулам, приведенным в работе (Радзиевский, Артемьев, Томанов, 1987). Итак, ниже будет применяться кометный каталог в трех системах координат.

§ 3.3. Радиус орбиты планеты

Если комета выходит на гелиоцентрическую орбиту из сферы влияния планеты, то один из узлов ее орбиты («рабочий» узел или место ее «рождения») обязан располагаться на орбите «родительской» планеты с отклонением от нее не более чем на

величину радиуса сферы влияния $\rho = 1.15 A \, \mathbf{m}_{n_1} / m_C^{-1/3}$. Гелиоцентрическое расстояние восходящего R_A и нисходящего R_D узлов кометных орбит определяется из формул (2.3). Результаты вычислений по формулам (2.3) приведены в табл. 3.2. Максимальное число узлов (N=675, или 42.6 % от общего числа) расположено на эклиптике (плоскость Π_3) на гелиоцентрических расстояниях R<2 а.е. На плоскостях Π_1 и Π_2 **V**3ЛОВ 1-2 эклиптике на % меньше. Ha гелиоцентрических расстояниях R < 6 а.е. расположено N = 1083, или 68% узлов. Плотность $\sigma = N/\pi \, (\!\!\! R_2^2 - R_1^2 \!\!\!\!)$ в зоне планет земной группы на плоскости Π_3 составляет $\sigma = 53.7$ (a.e.)⁻². Юпитера плотность уменьшается до орбиты $\sigma = 1.94 \text{ (a.e.)}^{-2}$. В поясе Койпера $\sigma \approx 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ (a.e.)}^{-2}$. Таким образом, абсолютное большинство узлов находится на малых гелиоцентрических расстояниях. Если «рождение» происходит в узлах, то место их рождения, возможно, находится в близкой околосолнечной области.

Наличие узлов кометных орбит на периферии Солнечной системы есть следствие определенной ориентации орбит в плоскости движения кометы, задаваемой величиной аргумента перигелия ω . Как следует из формул (2.3), гелиоцентрическое расстояние восходящего узла R_A будет достаточно большим, если значение $\cos \omega$ близко к -1, расстояние до нисходящего узла R_D примет большие значения при $\cos \omega \to +1$. Математический прогноз подтверждается данными наблюдений. На диаграмме «Аргумент перигелия — гелиоцентрическое расстояние узла» (рис. 2.1) имеют место всплески около значений ω равное 0° и 180° . Можно было бы показать, что обнаруженный новый эффект в кометной системе имеет простое геометрическое объяснение.

Распределение перигелиев ППК похоже на распределение узлов. На рис. 3.2 представлена зависимость объемной плотности перигелиев $\rho = 3N/4\pi$ $\P_2^3 - q_1^3$ от величины перигелийного расстояния q. Как видим, комплекс кометных перигелиев представляет собой ограниченную систему с R<3 а.е. Радзиевский (1981), Калиничева (2002) показали, что

наблюдаемое и истинное распределение перигелиев практически совпадают. Другими словами, кометные перигелии свободны от влияния наблюдательной селекции. Дело в том, что ППК довольно продолжительное время двигаются внутри сферы видимости. Время t пребывания ППК в сфере радиуса r_0 определяется из формулы Ламберта $t=54.7\sqrt{r_0-q}(r_0+2q)$. Так, комета с $e=1,\ q=3.5$ а.е. будет находиться внутри сферы $r_0=4$ а.е. в течение 425 суток. Но за это время Земля совершит более одного оборота, и, следовательно, реально может быть осуществлен мониторинг всей небесной сферы.

Таблица 3.2. Распределение гелиоцентрических расстояний восходящих и нисходящих узлов в трех плоскостях

$R_{A,D}$	Π_1			Π_2		Π_3
a.e.	N	σ , $(a.e.)^{-2}$	N	σ , $(a.e.)^{-2}$	N	σ , $(a.e.)^{-2}$
0–2	640	50.93	663	52.76	675	53.71
2–4	276	7.32	252	6.68	286	7.59
4–6	108	1.72	132	2.10	122	1.94
6–8	81	0.92	77	0.88	75	0.85
8–10	68	0.58	46	0.41	50	0.44
10-20	104	0.11	127	0.14	117	0.12
20-30	38	$2.42 \cdot 10^{-2}$	55	$3.50 \cdot 10^{-2}$	53	$3.37 \cdot 10^{-2}$
30–40	37	$1.68 \cdot 10^{-2}$	47	$2.13 \cdot 10^{-2}$	25	$1.14 \cdot 10^{-2}$
40-50	19	$6.72 \cdot 10^{-3}$	21	$7.43 \cdot 10^{-3}$	21	$7.43 \cdot 10^{-3}$
50-60	16	$4.63 \cdot 10^{-3}$	13	$3.76 \cdot 10^{-3}$	9	$2.60 \cdot 10^{-3}$
60–70	12	$2.94 \cdot 10^{-3}$	15	$3.67 \cdot 10^{-3}$	12	$2.94 \cdot 10^{-3}$
70–80	13	$2.76 \cdot 10^{-3}$	18	$3.82 \cdot 10^{-3}$	12	$2.55 \cdot 10^{-3}$
80–90	10	$1.87 \cdot 10^{-3}$	9	$1.69 \cdot 10^{-3}$	8	$1.50 \cdot 10^{-3}$
90-100	11	$1.84 \cdot 10^{-3}$	9	$1.51 \cdot 10^{-3}$	4	$6.70 \cdot 10^{-4}$
100-200	43	$4.56 \cdot 10^{-4}$	35	$3.71 \cdot 10^{-4}$	23	$2.44 \cdot 10^{-4}$
200-300	16	$1.02 \cdot 10^{-4}$	17	$1.08 \cdot 10^{-4}$	18	$1.15 \cdot 10^{-4}$
300-400	11	$5.00 \cdot 10^{-5}$	5	$2.27 \cdot 10^{-5}$	16	$7.28 \cdot 10^{-5}$
400-500	8	$2.83 \cdot 10^{-5}$	10	$3.54 \cdot 10^{-5}$	9	$3.18 \cdot 10^{-5}$
500-1000	29	$1.23 \cdot 10^{-5}$	11	$4.67 \cdot 10^{-6}$	17	$7.22 \cdot 10^{-5}$
>1000	44		22		32	

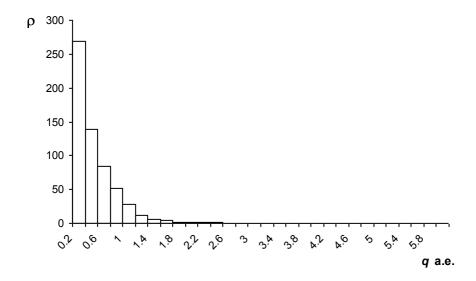


Рис. 3.1. Объемная плотность перигелиев ППК в функции перигелийного расстояния

Близкие к Солнцу узлы (R<3 а.е.), так же, как и перигелии, видимо, не подвержены влиянию наблюдательной селекции. Для прогноза построили этого МЫ проверки гистограммы распределения узлов для комет, открытых до 1800 г., а также в периоды 1800–1900 гг., 1900–1950 гг., 1950–2003 гг. Оказалось, что для всех указанных эпох характер распределения узлов примерно одинаков. На гистограммах максимум узлов и перигелиев находится на гелиоцентрических расстояниях 0.7 ÷ 0.9 а.е. Внутри орбиты Марса расположено 304 узла (38.4%) и 556 перигелиев (70.2%). Между орбитами Марса и Юпитера находится 227 узлов (28.7%), 204 перигелия (25.8%). Подводя вышеизложенному, констатировать онжом наличие исключительно важного феномена ДЛЯ системы параболических комет: узлы и перигелии ППК располагаются преимущественно в зоне планет земной группы.

Методику определения радиуса A орбиты материнской планеты с помощью комет предложил Радзиевский (1987). В

рамках математического аппарата круговой ограниченной задачи трех тел Радзиевский получил уравнение

$$\frac{3}{2} \left[1 - \overline{H}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\overline{Q}}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = -A\overline{H} + \frac{\overline{Q}}{\sqrt{A}}$$
 (3.2)

где $H = -\frac{1}{a}$ — удвоенная энергия кометы, отнесенная к модулю

энергии Земли; $Q=2\sqrt{(1+e)q}\cos i$ — удвоенный кинетический момент кометы в проекции на ось эклиптики в моментах Земли; $a,\ e,\ q$ — большая полуось, эксцентриситет, перигелийное расстояние кометной орбиты. Единица времени — год, длины — а.е. Здесь H, \overline{Q} — средние значения для используемого статистического коллектива.

Таблица 3.3. Радиус А орбиты «родительской» планеты

Плоскость	A, a.e.							
TIMOCKOCIB	i<90°	<i>i</i> >90°	все кометы					
Π 1	0.81; 1069	997	955					
Π_2	0.99; 1006	1332	940					
Пз	0.99; 812	1296	958					

Вещественные значения корней, полученные по формуле (3.2), приведены в табл. 3.3 в трех системах координат, как для всех орбит, так и отдельно, для прямых и обратных. Математический формализм прогнозирует наличие «родительских» планет как на малых гелиоцентрических расстояниях (0.81 а.е., 0.99 а.е.), так и на далекой периферии Солнечной системы.

Если происхождение комет связано с планетами, то независимо от механизма выброса кометы из сферы влияния планеты невозмущенная гелиоцентрическая орбита должна проходить в непосредственной близости от орбиты «родительской» планеты. Таким образом, стратегия поиска родительской планеты сводится к выяснению величины

межорбитального расстояния планет и комет. Полагая орбиты планет круговыми радиуса A, мы вычислили минимальное расстояние r орбиты каждой кометы от орбит гипотетических планет по формуле

$$r = \left\{ A^{2} + \left[\frac{q(1+e)}{1 + e \cos \theta} \right]^{2} - 2A \frac{q(1+e)}{1 + e \cos \theta} \sqrt{1 - \sin^{2} i \sin^{2} (\omega + \theta)} \right\}^{\frac{1}{2}}, (3.3)$$

где q, e, i, ω — элементы кометной орбиты в соответствующей системе координат (на плоскостях Π_1 , Π_2 , Π_3), \mathcal{S} — истинная аномалия, задаваемая при расчетах с шагом 1° .

Таблица 3.4. Расстояния между орбитами ППК и орбитами гипотетических планет

Плос	Плоскость Π_1			скость І	I_2	Плоскость Π_3			
A, a.e.	r, a.e.	N	A, a.e.	<i>r</i> , a.e.	N	A, a.e.	<i>r</i> , a.e	N	
0.81	0.5	452	0.99	0.5	485	0.99	0.5	484	
77	5	81	77	5	79	77	5	75	
100	5	47	100	5	35	100	5	46	
123	5	27	123	5	27	123	5	29	
150	5	17	150	5	9	150	5	17	
160	5	12	160	5	12	160	5	18	
201	5	12	201	5	4	201	5	11	
285	5	0	285	5	3	285	5	5	
955	10	1	940	10	0	812	10	0	
997	10	1	1006	10	0	958	10	1	
1069	10	3	1332	10	0	1296	10	2	

Для вычислений по формуле (3.3) использованы значения A для 11 гипотетических планет из табл. 3.3. Кроме того, использованы значения A гипотетических планет, прогнозируемых в ряде работ, отмеченных во введении. При этом расчеты проводились для орбит планет (i, Ω), полученных авторами цитируемых статей. Однако в табл. 3.4 результаты приведены для плоскостей Π_1 , Π_2 , Π_3 , поскольку различие оказывается практически незначимым. Результаты вычислений

по формуле (3.3) представлены в табл. 3.4, где для каждой из плоскостей Π_1 , Π_2 , Π_3 , в которой предполагается наличие планеты, дан радиус A данной гипотетической планеты, минимальное расстояние r от кометы до планеты и число Nкомет, которые проходили от орбиты этой планеты на расстоянии r, меньшем заданного значения. Для гипотетических орбит A = 0.81 а.е. и 0.99 а.е. (первая строчка табл. 3.4) принято $r \le 0.5$ а.е., для орбит с 1 а.е. < A < 300 а.е. $r \le 5$ а.е. во всех остальных строках табл. $3.4 - r \le 10$ а.е. Например, к орбите A = 0.99 а.е. на плоскости Π_3 проходили на расстоянии $r \le 0.5$ а.е. N = 484 кометы, к орбите A = 1069 а.е. на плоскости Π_1 на расстояниях $r \le 10$ а.е проходили N = 3 кометы. Из табл. 3.4 отчетливо видно, что абсолютное большинство комет проходят вблизи теоретических орбит, расположенных в зоне планет земной группы. При наличии гипотетических планет на далекой периферии Солнечной системы в распределении N можно было бы ожидать существование флуктуаций, но таковые отсутствуют (табл. 3.4).

§ 3.4. Приливная концепция происхождения комет и проблема X планеты в галактической плоскости

Одним из сторонников существования трансплутоновых планет является В.В. Радзиевский (1986, 1987, 1990, 1991а,б). Автор гипотезы предупреждает, что современное положение планет X исключает возможность их визуального наблюдения, а также обнаружения невязок в движении планет. В качестве наблюдательной основы Радзиевский использует два параметра, характерных для системы комет: распределение афелиев и распределение полюсов орбит ДПК. Предполагаемую орбиты концентрацию афелиев кометных К плоскости Радзиевский «родительской» называет эффектом планеты «Млечного Пути», а дефицит полюсов кометных орбит около полюса орбиты «родительской» планеты он именует «эффект рандеву» (R-эффект).

В качестве инструмента для поиска указанных «эффектов» использовался обычный географический глобус диаметром 43 см. На глобус наклеивались кружки из лейкопластыря, которые изображали либо афелии, либо полюса кометных орбит. В качестве измерительного прибора использовались проволочные кольца радиусом 20° и 40°. Методика исследования сводилась к подсчету полюсов кометных орбит на избранных площадках глобуса, ограниченных данными кольцами.

По мнению Радзиевского, указать на свою «материнскую» планету могли бы кометные «близнецы» - кометные ядра, одновременно прошедшие через горло в поверхности Хилла. Для целей проверки данной концепции Радзиевским были использованы почти параболические кометы, объединенные в пары по признаку малого различия угловых элементов орбит: долготы восходящего узла Ω , аргумента перигелия ω и угла наклона i. Такие пары комет были названы кометными близнецами.

Методику статистических доказательств существования Х планет с помощью кометных близнецов Радзиевский и др. (1989) определяют следующим образом: «Общая идея статистики кометных близнецов сводится к следующему. Формируются определенные функции, содержащие элементы орбит и их приращения или разности приращений. При случайном распределении тех и других эти функции должны иметь положительные И отрицательные значения вероятностью. Статистически весомое преобладание кометных пар с одноименным знаком той или иной функции будет рассматриваться как эффект статистики близнецов, говорящий в пользу их выброса из сферы действия массивной планеты, поскольку предсказание этих эффектов делается в рамках данной гипотезы. Таким образом, статистика кометных близнецов есть статистика знаков определенных функций».

Выбраны следующие функции:
$$E_1 = \Delta\Omega \cdot \Delta i \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$
, $E_2 = \Delta T \cdot \Delta p$, $E_3 = \Delta\Omega \cdot \Delta T \cdot \cos \frac{i_1 + i_2}{2}$, $E_4 = \Delta\Omega \cdot \Delta\omega \cdot \cos \frac{i_1 + i_2}{2}$,

 $E_5 = \Delta a \cdot \Delta p$, $E_6 = \Delta T \cdot \Delta L \cdot \cos \frac{i_1 + i_2}{2}$, где $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность эпох прохождения близнецов через перигелий, $\Delta p = p_2 - p_1$ — разность параметров орбит p = q(1+e) , $\Delta a = a_2 - a_1$ — разность больших полуосей, $\Delta L = L_2 - L_1$ — разность долгот перигелиев. Принято, что статистически существенное преобладание положительных или отрицательных знаков этих функций, которое Радзиевский называет первый (E_1) , второй (E_2) и т.д. эффекты статистики кометных близнецов, позволяет делать заключение о генетической близости компонентов пар.

Физическое обоснование «эффектов» сводится к следующему. Радзиевского Через горло поверхности Хилла в районе первой точки либрации L_1 одновременно проходят два кометных ядра G-I и G-II. Накладывается условие: близнец G-I имеет прямое движение относительно направления движения «материнской» планеты, G-II – обратное. Тогда трансверсальное возмущение со стороны материнской планеты на близнец G-I будет положительным, на G-II – отрицательным. G-I первым приходит в перигелий, значит $T_2 - T_1 > 0$, а разность параметров $p_2 - p_1 > 0$. В результате более позднего прихода в перигелий близнеца G-II происходит смещение перигелия, и поэтому $\Delta L > 0$. Подобным образом определяется знак величин $\Delta\Omega$, $\Delta\omega$, Δi , Δa , $\omega_{_{-p}}$, $i_{_{cp}}$ и в конечном итоге знак всех функций E_i . Радзиевский учитывает не величину функций E_i , а лишь ее знак. Число кометных близнецов, имеющих $E_{\scriptscriptstyle i} > 0$, обозначается $n^{\scriptscriptstyle +}$ и соответственно n^{-} , если $E_{i} < 0$. Согласно Радзиевскому, должны существовать «эффекты»: $E_1 > 0$, $E_2 > 0$, $E_3 > 0$, $E_4 < 0$, $E_5 < 0$, $E_6 > 0$. В табл. 3.5 по каждому «эффекту» E_i приведены n^+ , n^- , $n^{+} + n^{-} = n, n^{+}/n^{-}.$

Оценим вероятность случайности w наблюдаемого соотношения величин n^+ и n^- . По первому эффекту E_1 : n^+ =253,

 n^- =231. Какова вероятность w того, что преобладание положительных значений функции E_1 есть случайный результат? Вероятность того, что преобладание n^+ при равновероятном распределении будет таким, как наблюдалось, или меньше,

равна
$$P=\psi\!\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)\!=0.68269$$
, где $\psi\!\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)$ – интеграл вероятности,

$$\sigma = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 0.5}{484}} = 0.02273, \quad \alpha = \frac{253}{484} - \frac{1}{2} = 0.02273 \quad \text{(Агекян, 1972)}.$$

Вероятность того, что отклонение будет таким, как наблюдалось, или большим, равна w=1-0.68269=0.31731. Значения w по каждому эффекту приведены в табл. 3.5. Статистическая значимость «эффектов» различна. Так, для E_2 величина n^+/n^- равна 1.782, с другой стороны, положительные и отрицательные значения, к примеру E_3 , встречаются одинаково часто: $n^+=243$, $n^-=241$.

Таблица 3.5. Эффекты статистики кометных близнецов

Эффекты	n n^+		$n^{}$	$n^+/_{n^-}$	W	
F	101	252	221	/ n	0.21721	
E_1	484	253	231	1.095	0.31731	
E_2	484	310	174	1.782	10^{-8}	
E_3	484	243	241	1.008	0.92829	
E_4	484	234	250	0.936	0.46539	
E_5	35	18	17	1.059	0.86501	
E_6	484	256	228	1.123	0.20408	

«Эффекты» Радзиевского могут иметь альтернативную интерпретацию, поскольку принципиально возможно применить методику статистики близнецов не только к гипотетическим, но и к реальным планетам Солнечной системы. Пусть кометы выходят на гелиоцентрические орбиты, например, из сферы действия (СД) Юпитера. Механизм выброса комет из СД может быть эруптивным по схеме Всехсвятского (1967) – Дробышевского (1988) или выброс в результате пертурбационного маневра по схеме Лапласа (Батраков, 1993;

Торбетт, 1986). Пусть в момент t_1 из СД вышло кометное ядро G-I, в момент t_2 на идентичную орбиту ушел близнец G-II. За время $\Delta t = t_2 - t_1$ изменение долготы планеты составляет Δl . Место старта комет на гелиоцентрическую орбиту есть узлы долготы которых Ω_1 Ω_2 . Очевидно, $\Delta l = \Delta \Omega = \Omega_{_2} - \Omega_{_1} > 0$. Если большие полуоси орбит близнецов равны ($a_1 = a_2$), то после первого обращения первым вернется в перигелий G-I. Следовательно, $\Delta T = T_2 - T_1 > 0$. Если оба близнеца имеют прямое движение, то $\cos i_{cp} > 0$. Таким образом, $E_3 = \Delta\Omega \cdot \Delta T \cdot \cos i_{cn} > 0$. Аналогично онжом объяснить требуемое преобладание знаков других функций E_i .

Происхождение всего комплекса долгопериодических комет Радзиевский пытается объяснить с помощью двух гипотетических планет: одна с прямым движением (i<90°), другая — с обратным (i>90°). Согласно Радзиевскому, орбита данной планеты имеет наклон к эклиптике i = 52° — 60° , долготу восходящего узла Ω = 270° — 285° . Период планеты P около 1800 лет, масса m около 40 земных масс, видимая звездная величина V = 17^{m} — 18^{m} . Все результаты получены методами кометной статистики и, по оценке Радзиевского, имеют вероятные отклонения порядка 10° для углов и 20—30 % для других величин.

Плоскость орбиты данной планеты Радзиевский принимает совпадающей с плоскостью Галактики и настоятельно подчеркивает, что, применяя статистический метод, следует использовать кометные орбиты в системе координат, где за основную плоскость принята плоскость орбиты «родительской» планеты. С этой целью мы опубликовали кометный каталог в галактической системе координат (Калиничева, Томанов, 1998).

Если планета X ответственна за происхождение ДПК, то в элементах кометных орбит должны были сохраниться какие-то наследственные признаки. Проанализируем в космогоническом аспекте распределение наклонов, афелиев, узлов 754 кометных орбит.

Распределение наклонов і орбит комет к галактической плоскости. В работе Радзиевского (1979) показано, «что независимо от расстояния от Солнца любая планета или ее спутник извергают почти параболические кометы с прямым движением, число которых (n^+) больше числа комет с обратным движением (n^-) по крайней мере в 4,3 раза». Действительно, выброс кометных ядер из сферы действия планеты был бы наиболее вероятен в направлении апекса движения планеты, поскольку вектор скорости извержения будет складываться со скоростью планеты.

Как видно из табл. 3.6, $n^+=365$, $n^-=389$, $n^+/n^-=0.94$. Кометы, извергнутые X планетой, должны были бы двигаться в основном около плоскости Галактики. Однако комет с наклоном $i<10^\circ$ всего лишь $n^+=5$. Таким образом, наблюдаемое распределение наклонов орбит ДПК к галактической плоскости не согласуется с гипотезой существования X планеты.

Таблица 3.6. Распределение наклонов i орбит комет к галактической плоскости

i	n	i	n
0°-10°	5	90°-100°	56
10–20	21	100-110	62
20–30	21	110–120	79
30–40	41	120-130	65
40–50	43	130–140	50
50-60	56	140–150	39
60–70	66	150–160	30
70–80	53	160–170	5
80–90	59	170–180	3
0–90	365	90–180	389

Распределение афелиев. Радзиевский (1987) отмечает, что афелии ДПК на небесной сфере должны находиться рядом с орбитой «материнской» планеты. Следовательно, если существует «материнская» планета в галактической плоскости, то кометные афелии должны концентрироваться к этой

плоскости. По мнению Радзиевского, кометные афелии концентрируются к галактическому экватору. По данным Дельземма (1989), в распределении афелиев по галактической широте существуют минимумы у галактического экватора и полюсов.

Проверим результаты этих авторов, используя 754 ДПК в появлениях до 1998 г. В последней колонке табл. 3.7 дано афелиев ПО галактической распределение широте Приведенные данные подтверждают правоту Дельземма. На рис. 3.2 распределение плотности представлено $\sigma = n/S$ кометных афелиев по широте b, где S – площадь кольца, $\Delta b = 5^{\circ}$. Действительно, на галактических широтах от -5° до +15° имеет место дефицит кометных афелиев.

Таблица 3.7. Распределение афелиев по равновеликим площадкам небесной сферы в галактической системе координат

l	0°-	30-	60-	90-	120-	150-	180-	210-	240-	270-	300-	330-	Всего
b	30°	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
+90°+56°.4	1	1	2	3	0	2	2	2	2	2	5	2	24
+56.4+41.8	4	5	2	3	6	1	1	6	3	4	7	2	44
+41.8+30.0	1	3	5	6	4	4	6	7	2	5	3	6	52
+30.0+19.5	4	4	4	4	8	4	7	10	5	7	6	5	68
+19.5+9.6	4	5	1	2	10	7	13	5	4	6	11	3	71
+9.6+0.0	6	1	0	0	3	3	17	11	3	5	2	1	52
+0.09.6	10	7	0	2	0	3	4	51	2	4	9	4	96
-9.619.5	7	5	2	3	6	5	12	8	3	3	9	5	68
-19.530.0	8	5	4	4	12	5	4	13	4	5	15	10	89
-30.041.8	6	9	13	3	8	5	5	10	7	9	14	3	92
-41.856.4	5	7	4	6	9	3	4	5	2	5	6	4	60
-56.490.0	3	4	3	2	2	2	1	5	6	1	2	7	38
Всего	59	56	40	38	68	44	76	133	43	56	89	52	754

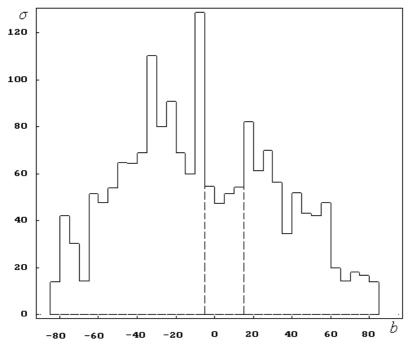


Рис. 3.2. Зависимость плотности σ кометных афелиев от галактической широты

В табл. 3.7 приведено распределение афелиев по 144 равновеликим площадкам небесной сферы. При равновероятном каждой площадке должно распределении на было содержаться афелиев 5.2±0.4. Однако некоторые площадки полностью свободны от афелиев, на 11 площадках расположено более 10 афелиев. Особо выделяются две зоны около экватора: галактического В зоне $-9.^{\circ}6 < b < +9.^{\circ}6$; $180^{\circ} < l < 240^{\circ}$ содержится 83 афелия, а в зоне $-9.^{\circ}6 < b < +9.^{\circ}6$; $60^{\circ} < l < 120^{\circ}$ расположено всего 2 афелия.

Распределение афелиев по галактической долготе приведено на рис. 3.3. В распределении существуют минимумы в направлении на антицентр Галактики и в квадратурах. Повидимому, распределение афелиев по галактической долготе определяется влиянием галактического ядра. Распределение

афелиев по широте, согласно Дельземму (1989), определяется влиянием приливных сил со стороны галактического диска.

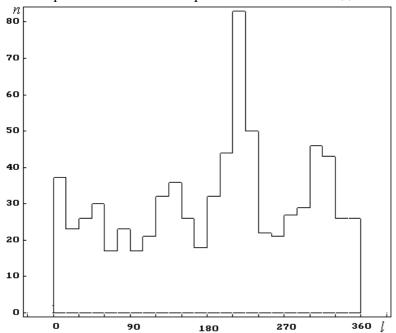


Рис. 3.3. Распределение ДПК по долготе афелия в галактической системе координат

Распределение узлов. Если кометные ядра выброшены планетой X, то узел гелиоцентрической орбиты кометы должен располагаться около орбиты «материнской» планеты. Это означает, что гелиоцентрическое расстояние R одного из узлов должно быть равно A радиусу орбиты этой планеты. В табл. 3.8 приведено распределение гелиоцентрических расстояний узлов в галактической системе координат для всех комет и отдельно для прямых и обратных. Большинство узлов расположено на малых гелиоцентрических расстояниях. На расстоянии R < 2 а.е. расположено около 50 % узлов, на интервале 2 < R < 4 а.е. узлов всего около 15 %, на интервале 4 < R < 6 а.е. узлов лишь около 7 %. В последней колонке табл. 3.8 представлена средняя плотность $\sigma_R = n/S$ кометных узлов всех комет в кольце, ограниченном значениями R. На расстояниях 0 < R < 2 а.е. ($\overline{R} = 1$ а.е.) — зона

планет земной группы — плотность узлов очень высокая: σ =58.7 (а.е.) $^{-2}$. Затем плотность узлов резко падает, при R = 5 а.е. становится равной 1.7 (а.е.) $^{-2}$. На расстоянии R>10 а.е. σ \rightarrow 0 и уменьшение σ идет плавно, без флуктуаций. Таким образом, какие-либо признаки существования планеты X на больших гелиоцентрических расстояниях X = 2 а.е. не обнаруживаются.

Таблица 3.8. Распределение гелиоцентрических расстояний узлов

R	все кометы	i<90°	i>90°	$\sigma_{\!R}$
a.e.	n	n	n	
0-2	738	343	395	58.7
2-4	229	110	119	6.1
4-6	109	47	62	1.7
6-8	55	28	27	0.6
8-10	34	17	17	0.3
10-20	104	57	47	0.11
20-30	44	26	18	0.028
30-40	38	23	15	0.017
40-50	17	8	9	0.006
50-60	12	3	9	0.003
60-70	11	8	3	0.0027
70-80	15	11	4	0.0032
80-90	9	3	6	0.0017
90-100	6	3	3	0.0010
100-200	24	14	10	0.00025
200-300	14	6	8	0.00009
300-400	5	3	2	0.000023
400-500	6	4	2	0.000021
500-1000	8	5	3	0.0000034
>1000	16	9	7	

Однако математический формализм указывает на возможность альтернативного решения проблемы происхождения комет: источник комет может находиться в зоне планет земной группы. Решение кубического уравнения (3.2) дает вещественное значение A = 0.8 а.е. С другой стороны,

именно в зоне планет Венера-Земля находится максимум в распределении узлов (табл. 3.8). В качестве механизма, обеспечивающего «рождение» комет в зоне планет земной группы, можно рассматривать захват межзвездных комет по схеме Лапласа (Торбетт, 1986; Батраков, Кудиелка, 1993).

Проблема планеты X в контексте кометной космогонии весьма привлекательна для исследователей. Дело в том, что в ходе решения этой комплексной задачи можно попытаться одновременно разрешить две глобальные проблемы: открыть планету и понять как «рождаются» кометы. Однако увлечение данной задачей, по-видимому, мало перспективно. По глубокому убеждению авторов, X планеты, как источника комет, не существует.

§ 3.5. Об одном варианте предсказания гипотетических планет

Рассмотрим гипотезу Гулиева (1992)0 двух трансплутоновых планетах, основанную на некотором преобладании узлов кометных орбит в двух зонах. Согласно (1992),существует избыток на гелиоцентрических расстояниях 48.5-56.6 а.е. в плоскости:

$$\Omega = 262^{\circ}.9$$
, i = 29°.6, (3.4)

а также преобладание узлов на интервале 102–112 а.е. в плоскости:

$$\Omega = 341^{\circ}, i = 30^{\circ}.5.$$
 (3.5)

Для проверки гипотезы о трансплутоновых планетах в плоскостях (3.4) и (3.5) мы создали два кометных каталога в координатных системах, где за основные плоскости приняты плоскости (3.4) и (3.5).

Распределение кометных узлов на плоскости (3.4) имеет такой же характер распределения, как и на эклиптике (табл. 2.1): наблюдается очень высокая концентрация узлов на малых гелиоцентрических расстояниях, а далее идет резкий спад по экспоненте. На расстоянии R<2 а.е. расположено 687 (46%) узлов, плотность $\sigma = 54.7$ (а.е.)⁻². На интервале 10 а.е. < R < 20 а.е. находится 103 узла, плотность здесь $\sigma = 0.1$ (а.е.)⁻², что в 500 раз

меньше, чем в околосолнечной области (R<2 a.e.). Узлы, расположенные на расстояниях R>20 а.е., можно считать спорадическими: на гелиоцентрических расстояниях 20 a.e. < R< 120 а.е. на площади S=43982 (а.е.) расположены 184 узла, что в среднем составляет 4.2 узла на 1000 (а.е.)². Положение узлов на плоскости (3.4) в интервале 20 а.е. < R < 120 а.е. изображено на рис. 3.4. Концентрические окружности проведены через 20 а.е. На рис. 3.4 затонировано кольцо между радиусами 48.5 а.е. и 56.6 а.е., на котором, согласно Гулиеву (1992), якобы существует избыток узлов кометных орбит и где находится трансплутоновая планета. Данная версия несостоятельна: на указанном кольце расположено всего лишь 14 узлов, плотность $\sigma = 5.2 \cdot 10^{-3}$ (a.e.)⁻² или, другими словами здесь содержится 5.2 узла на 1000 (a.e.)^2 . столь мизерном статистическом материале даже вероятностные оценки уже становятся некорректными.

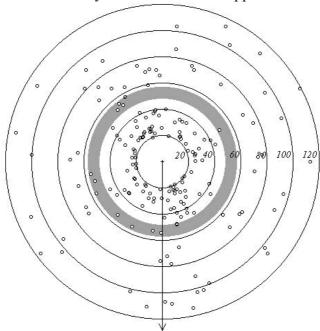


Рис. 3.4. Положение узлов на плоскости (3.4) в интервале 20 а.е. < R < 120 а.е.

Наличие узлов кометных орбит на периферии Солнечной системы есть следствие определенной ориентации орбит в плоскости движения кометы, задаваемой величиной аргумента перигелия ω . Данный эффект в кометной системе имеет геометрическую интерпретацию (см. § 2.1).

Таблица 3.9. Кометы, имеющие узлы на интервале 48.5–56.6 а.е. (плоскость (3.4))

Комета	q	Q	ω	N	i	λ_{π}	eta_π	R_A	R_D
C/1665 F1	0.11	-	174.9	320.6	80.9	139.8		53.79	0.11
C/1826 P1	0.85	679	346.2	155.8	50.7	147	-10.6	0.87	54.43
C/1852 K1	0.91	-	15.1	35.1	108.4	30.2	14.3	0.92	52.45
C/1911 N1	0.68	369	168.3	296.1	147.9	126.1	6.2	55.94	0.69
C/1922 U1	2.26	-	156.6	280.9	38.4	82.2	14.3	55.42	2.36
C/1929 Y1	0.67	1382	192.6	286.5	120.9	99.9	-10.8	53.68	0.68
C/1948 R1	4.71	-	214.0	217.6	75.3	47.3	-32.7	55.08	5.15
C/1952 H1	1.28	148	165.5	221.4	136.5	52	9.9	52.45	1.30
C/1954 O2	3.87	-	148.6	352.1	71	160.9	29.5	53.02	4.18
C/1984 K1	2.70	-	206.7	119.4	135.4	279.7	-18.4	50.90	2.85
C/1984 U1	5.49	2286	216.7	359.1	149.7	146.4	-17.5	54.20	6.09
C/1992 J2	0.59	-	12.7	315	151.6	303.7	6	0.60	48.42
C/1998 M1	3.12	858	153.8	210.2	11.6	4.5	5.1	56.88	3.29
C/2000 B2	3.78	-	148.0	13.4	64.7	178.4	28.6	49.70	4.09

В комплексе ППК имеются 182 кометы с узлом за пределами планетной системы — $R_{A,D} > 40$ а.е. По версии Гулиева (1992), 14 комет генетически связаны с планетой, движущейся в плоскости (3.4) на расстояниях 48.5 ÷ 56.6 а.е. В табл. 3.9 приведены элементы орбит этих комет в системе координат на плоскости (3.4). Из табл. 3.9 легко видеть, что перигелии расположены около узлов: перигелийное расстояние q почти равно гелиоцентрическому расстоянию $R_{A,D}$ одного из узлов, долгота перигелия λ_{π} либо близка к долготе восходящего, либо нисходящего узла. У комет С/1948 R1 и С/1984 U1 и перигелий, и узел лежат около орбиты Юпитера. Таким образом, можно

предполагать, что кометы испытали планетные возмущения в районе перигелия.

В отличие от перигелиев, афелии с узлами не связаны. Среди 14 орбит есть 2 гиперболы и 5 парабол. У эллиптических орбит величина афелийного расстояния Q колеблется в пределах от 148 а.е. (С/1952 H1) до 15210 а.е. (С/1954 O2) — табл. 3.9. Таким образом, афелии располагаются вне зоны гипотетической трансплутоновой планеты.

Распределение наклонов i кометных орбит имеет случайный характер: от 11°.6 до 151°.6 (табл. 3.9). Если кометы динамически связаны с трансплутоновой планетой, то они имели бы какое-то преимущественное направление движения. Например, известно, что все короткопериодические кометы семейства Юпитера имеют прямые движения и малые наклоны i. Весьма существенно, что аргумент перигелия ω близок либо к нулю, либо к 180°, что обеспечивает большое гелиоцентрическое расстояние узла.

Вышеотмеченные замечания относительно планеты в плоскости (3.4) имеют место и по отношению к плоскости (3.5). Так, Гулиев (1992) предполагает наличие планеты в плоскости (5) на основании якобы наблюдаемого избытка узлов на интервале 102 а.е. -112 а.е. Но фактически в этом интервале гелиоцентрических расстояний находится всего лишь 10 узлов, или 1.5 узла на 1000 (а.е.)², в то время как в целом на интервале 20 а.е. -120 а.е. расположено 153 узла, или в среднем 3.5 узла на 1000 (а.е.)².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альвен X., Аррениус Γ . Эволюция Солнечной системы. М.: Мир, 1979. 511 с.
- Антонов В.А., Тодрия З.П. Движение долгопериодических комет в возмущающем поле Галактики. Иррегулярные силы // Астрон. журн. -1987. T.64. №5. C. 1094–1104.
- Агекян T.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 1972. 172 с.
- *Батраков Ю.В., Кудиелка В.* On possible transfer of interstellar comets to the family of NEO // Астероидная опасность 93 (результаты работы МИПАО в 1992-1993 гг.) 25-27 мая 1993 г. СПб, 1993. С. 56-57.
- Беляев Н.А., Кресак Л.К., Питтих Э.М., Пушкарев А.Н. Каталог короткопериодических комет. Братислава: АИСАН, 1986. 400 с.
- *Бирюков Е.Е.* Захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа и орбиты семейства Юпитера // Астрон. вестн. -2007. Т. 41. № 3. С. 232–240.
- Бирюков Е.Е. Исследование динамической эволюции комет галлеевского типа // Автореф. дисс. кандидата физ.—мат. наук. СПб: ИПА РАН. 2008. 18 с.
- Всехсвятский С. К. Замечания к работам Оорта, посвящённым вопросам происхождения и эволюции комет // Астрон. журн. -1954. T.31. № 6. C.537–543.
- *Всехвятский С. К.* Природа и происхожение комет и метеорного вещества. М.: Просвещение. 1967. 183 с.
- *Всехсвятский С.К.* Об облаке Оорта // Астрометрия и астрофизика. 1969. №4. С. 207–208.
- *Всехсвятский С.К., Гулиев А.С.* Система комет Урана пример эруптивной эволюции спутников планет // Астрон. журн. 1981. T.58. № 3. C. 630–635.

- Голенецкий С.П., Степанок В.В., Малахов С.Г. и др. Химический состав кометного вещества и его предполагаемая роль в формировании микроэлементного состава внешних оболочек Земли // Кометы и метеориты. -1980. № 29-31. С. 21-31.
- *Горшкова О.А., Кузъмичев В.В.* Космогонические закономерности в комплексе короткопериодических комет // Кинематика и физика небесных тел. -2006. -T. 22. -№ 3.
- *Гулиев А.С.* О возможности существования в зоне Нептун–Плутон неизвестной планеты // Кинематика и физика небесных тел. 1987. Т.3. № 2. С. 28–33.
- *Гулиев А.С.* О возможности существования двух трансплутоновых планет // ПАЖ.. 1992. Т.18. №2. С. 183–189.
- Гулиев А.С. Космогонические характеристики систем периодических, промежуточных и долгопериодических комет: Автореф. дис. д–ра физ.–мат. наук. Киев, 1993. 15 с.
- *Гулиев А.С.* Об одном трансплутоновом планетном семействе // Кинематика и физика небесных тел. 1994. Т. 11. № 2. С. 44–46.
- *Гулиев А.С.* Результаты исследования узловых расстояний долгопериодических комет // Кинематика и физика небесных тел. -1999. T. 12. № 1. C.85-92.
- *Гулиев А.С.* Транснептуновый объект 2003 UB 313 как источник комет// Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 1. С. 51–60
- *Гулиев А.С., Дадашов А. С.* О гипотезе Оорта // Кинематика и физика небесных тел. -1985. Т. 1. № 6. -С. 82–87.
- *Гулиев А.С., Дадашов А.С.* О трансплутоновых кометных семействах // Астрон. вестн. -1989. Т. 23. № 1. С.88-95.
- *Гулиев А.С., Набиев Ш. А.* Плутон и кометы. 1. Существует ли группа комет, связанная с Плутоном // Кинемат. и физ. небесн. тел. -2001. -T.18. -№ 6. -C. 525–531.

- *Гулиев А.С., Набиев Ш. А.* Плутон и кометы. 2. Особенности кометной группы, имеющей возможную связь с Плутоном // Кинемат. и физ. небесн. тел. -2004. Т. 20. № 3. С. 283—288.
- *Гулиев А.С., Набиев Ш. А.* Плутон и кометы. 3. Возможные механизмы взаимосвязи комет с Плутоном // Кинемат. и физ. небесн. тел. -2005. Т. 21. № 1. С. 53–59.
- Давыдов В.Д. О возможном механизме происхождения периодических комет // Космич. исслед. 1981. Т. 19. № 5. С. 749—762.
- Добровольский О.В., Каймаков Е.А., Матвеев И.Н. Молекулы межзвездной среды и кометных ядер // Кометы и метеоры. 1977. № 26. C. 3-8.
- Дробышевский Э.М., История Титана, колец и магнитного поля Сатурна и природа короткопериодических комет. Препринт № 674 Физ.—тех. ин—т. Л.: ЛИЯФ, 1980.
- Дробышевский Э.М. Крупномасштабная электрохимия в ледяных луноподобных телах и природа малых тел Солнечной системы. Препринт физ.—тех. ин—та. 1984.— № 897. 22 с.
- Дробышевский Э.М. Физические основы и современное состояние эруптивной космогонии малых тел // Труды международной конференции «Четвертые Всехсвятские чтения. Современные проблемы физики и динамики Солнечной системы», Киев, 4-10 октября 2000. Киев, 2001. С. 99-102.
- *Дубошин Г.И.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968. 800 с.
- *Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 318 с.
- Казимирчак-Полонская Е.И. Обзор исследований тесных сближений короткопериодических комет с Юпитером (1770-

- 1960) // Труды Ин-та теор. астр. АН СССР, 1961. Т.7. С. 19–190.
- *Казимирчак-Полонская Е.И.* Астрон журн. 1967. Т.44. № 2. С. 439-460.
- Казимирчак-Полонская Е.И. Захват планет Юпитером и некоторые закономерности в вековой эволюции кометных орбит // Проблемы исследования Вселенной. М.,Л.: АН СССР. 1978а. №7. С. 340—383.
- Казимирчак—Полонская Е.И. О роли Нептуна в преобразованиях кометных орбит и о происхождении комет //Астрометрия и небесная механика. Серия: Проблемы исследования Вселенной. М.,Л.:АН СССР, 1978б. С. 384–417.
- *Калиничева О.В.* Наблюдательная селекция при открытии комет // Астрон. вестн. -2002. Т. 36. № 3. С. 282–288.
- *Калиничева О.В., Томанов В.П.* Планетные семейства долгопериодических комет / Вологод. гос. пед. ун-т. Вологда, 1998. 47 с. Деп. в ВИНИТИ 07.12.98. № 3562-В98.
- Коноплева В.П. О существовании семейств Юпитера и Сатурна среди непериодических комет // Комет. цирк. 1980. № 258. С. 2—3.
- Константинов Б.М., Бредов М.М., Белявский А.Н., Соколов И.А. О возможной антивещественной природе микрометеоров // Косм. исследования. -1966. -T. 4. -№ 1. -C. 66–73.
- *Кресак Л.* Спутники Урана и гипотеза извержения комет // Астрон. вестн. -1983. Т. 17. № 1. С. 27–31.
- *Кузьмичев В.В.* Космогонические закономерности в комплексе почти параболических комет // Кинематика и физика небесных тел. -2003. Т. 19. № 6. С. 523–533.
- *Кузьмичев В.В., Томанов В.П., Горшкова О.А.* Эволюция орбит короткопериодических комет // Вологда, 2004. 278 с. Деп. ВИНИТИ 16.12.2004 № 2017—B2004.

- *Мазеева О.А.* Роль гигантских молекулярных облаков в эволюции кометного облака Орта // Астрон. вестн. -2004. Т. 38. № 4. С.372–382.
- *Маковер С.Г.* К вопросу о происхождении короткопериодических комет // Бюлл. ИТА. 1967. Т.11. № 2. С. 123–126.
- Мулътон Ф.Р. Эволюция Солнечной системы. Одесса, 1908. 206 с.
- *Натансон С.Г.* О происхождении комет // Труды обсерватории Ленинградского гос. ун–та, 1923. Т. 4. С. 18–24.
- *Науменко Б.Н.* О заплутоновых планетах в Солнечной системе // Астрон. циркуляр. -1982. -№ 1217. C. 6–8.
- *Николаева М.В., Томанов В.П.* Распределение орбит в гипотезе извержения комет // Астрон. цирк. -1984. -№ 1306. C. 1-4.
- Николаева М.В., Томанов В.П. О гипотезе извержения комет из спутников Сатурна, Урана и Нептуна // Структура и эволюция космогонических объектов. Алма–Ата, 1987. Т. 48. С. 149–156.
- *Орлов С.В.* Эволюция и происхождение комет // Астрон. ж. 1939. Т. 16. № 1. С. 3–27.
- Потапов И.Н., Сухоплюева Л.Е., Влияние ядра Галактики на распределение перигелиев долгопериодических комет // Методы исследования движения, физика и динамика малых тел Солнечной системы. Тез. док. Душанбе, 1989. С. 58.
- Потапов И.Н., Томанов В.П. Эффект широтной селекции в распределении перигелиев орбит // Астрон. цирк. 1980. № 1106 С. 6—8.
- *Радзиевский В. В.* Небесно–механические аспекты гипотезы извержения // Астрон. вестн. 1979. Т. 13. № 1.– С. 32–41.

- Радзиевский В.В. Вероятность открытия комет как критерий их происхождения// Астрон. журн. 1981. Т. 58. № 6. С. 1286—1294.
- Радзиевский В.В. О существовании массивных трансплутоновых тел с обратным движением // Анализ движения тел Солнечной системы. Сборник трудов ЛГУ. Рига, 1986. С. 126-143.
- *Радзиевский В.В.* Происхождение и динамика кометной системы // Кинематика и физика небесных тел. -1987. Т. 3. № 1. С. 66–77.
- Радзиевский В.В. К вопросу о захвате комет из апекса Солнца // Астрон. журн. 1990. Т.67. № 5. С. 1057—1060. Радзиевский В.В. Пульсирующие поверхности Хилла и происхождение комет // Астрон. вест. 1991а. Т. 25. № 2. С. 181-189.
- Радзиевский В.В. Статистические подтверждения приливной концепции происхождения почти параболических комет // Астрон. вестн. -19916. -T. 25. -№ 3. -C. 302-308.
- Радзиевский В.В., Томанов В.П. К вопросу о происхождении почти параболических комет // Астрон. журн. 1970. Т. 47. № 5. С. 1094–1099.
- Радзиевский В.В., Томанов В.П. Новые данные в пользу межзвездного происхождения комет // Астрон. вестн. 1973. Т. 7. № 2. С. 73—82.
- *Радзиевский В.В., Томанов В.П.* Некоторые эффекты селекции при открытии комет // Астрон. журн. 1976. Т. 53. № 6. С. 1315–1317.
- *Радзиевский В.В. Томанов В.П.* О захвате комет по схеме Лапласа // Астрон. журн. 1977а. Т. 54. № 2. С. 388–397
- Радзиевский В.В., Томанов В.П. Статистические следствия захвата комет по схеме Лапласа // Астрон. журн. 1977б. Т. 54.— № 4. С. 890—896.

- Радзиевский В.В., Томанов В.П. Распределение кометных перигелиев по фазовому углу // Кометы и метеоры. 1982. № 33. С. 29—34.
- Радзиевский В.В., Томанов В.П. Астрон. вестн. 1985. Т. 19. № 2. С. 120-124.
- Радзиевский В.В. К вопросу о захвате комет из апекса Солнца // Астрон. журн. 1990. Т. 67. № 5. С. 1057-1060.
- *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- *Терентьева А.К.* О «зеркальной симметрии» в С-распределении малых тел Солнечной системы // Астрон. циркуляр. 1986а. № 1472. С. 3-5.
- *Терентьева А.К.* К вопросу о происхождении малых тел Солнечной системы // Астрон. циркуляр. 1986б. № 1472. С. 5—6.
- *Томанов В.П.* Зависимость наклонности кометных орбит от долготы восходящего узла// Астрон. журн. 1975. Т.52. № 6. С. 1332–1333.
- *Томанов В.П.* Апекс Солнца относительно протокометного облака // Астрон. журн. 1976. Т. 53. № 3. С. 647–654.
- *Томанов В.П.* Об асимметрии в распределении перигелиев кометных орбит // Астрон. журн. 1977. Т. 54. №6. С. 1346–1348.
- *Томанов В.П.* Распределение узлов и перигелиев 110 близпараболических комет // Астрон. журн. 1979. Т. 56. № 5. С. 1122–1123.
- *Томанов В.П.* О происхождении короткопериодических комет // Кометы и метеоры. -1980а. -№ 28.- С. 26–32.
- Томанов В.П. Эволюция размеров и форм кометных орбит при наличии сопротивляющейся среды // Астрон. журн. 1980б. Т. 57. № 2. С. 372—377.

- *Томанов В.П.* К вопросу захвата комет Юпитером // Астрон. журн. 1980. Т. 57. № 4. С. 816–823; 1981. Т.58. № 2. С. 408–415.
- *Томанов В.П.* Замечание по гипотезе извержения комет // Определение координат небесных тел. Рига, 1981. C.55 60.
- *Томанов В.П.* О тесных сближениях комет с Юпитером // Астрон. цирк. -1982. -№ 1224. C. 1-3.
- *Томанов В.П.* О гипотезах захвата и извержения комет // Астрон. вестн. -1983a. -T. 17. -№ 1. -C. 35–42.
- *Томанов В.П.* О критике теории захвата комет // Астрон. журн. 19836. T.58. № 2. C. 408–415.
- *Томанов В.П.* О семействе комет Урана // Динамика галактических и внегалактических систем. Алма–Ата, 1983в. С. 98–103.
- *Томанов В.П.* Существует ли семейство короткопериодических комет Сатурна? // Астрон. цирк. -1983г. -№ 1254. С. 4–6.
- *Томанов В. П.* Об эволюции комет // Бюлл. ИТА АН СССР, 1984. Т. 156. № 6. С. 340–347
- *Томанов В.П.* О межзвездном происхождении комет // Астрон. календарь 1987. М: Наука, 1986. С. 165–171.
- Томанов В. П. Кометная космогония. Вологда, 1989. 96 с.
- *Томанов В.П.* Статистическая проверка гипотезы извержения комет// Астрон. вестн. -1991. Т. 25. № 3. С. 312–316.
- *Томанов В.П.* О происхождении комет: Автореф. дис. д–ра физ.—мат. наук. $M:M\Gamma Y$. 1992. 29 с.
- *Томанов В.П.* О связи комет с планетами // Кинематика и физика небес. тел. 2007. Т. 23. С. 273–285.
- Томанов В.П., Калиничева О.В. Гипотетические планеты и происхождение комет. Препринт № 15 / ГАО РАН. СПб.: Глаголъ, 1999. 32 с.

- *Томанов В.П., Калиничева О.В.* О несостоятельности гипотезы Радзиевского о происхождении комет // Четвертые Всехсвятские чтения. Киев, 2000. С. 36–37.
- *Томанов В.П., Кузьмин С.В.* Аргументы в пользу реальности трансплутоновой планеты // Астрон. цирк. 1989. № 1540. С. 25.
- Томанов В.П., Кузьмин С.В., Аксеновский А.Г. Захват межзвездных комет // Астрон. вестн. 1994. Т.28. № 2. С. 83—94.
- Томанов В.П., Кузьмичев В.В., Горшкова О.А., Бахвалов Р.Н. Сближения короткопериодических комет с большими планетами. Вологда, 2005. 237 с. Деп. ВИНИТИ 06.10.2005. №1282—В2005.
- Томанов В.П., Радзиевский В.В. О распределении узлов и полюсов орбит долгопериодических комет // Астрон. вестн. 1975. T. 9. № 1. C. 35-40.
- Фесенков В.Г. О природе комет и условиях падения их на Землю // Метеоритика, 1961. № 21. C. 3-14.
- Фоменкова М.Н., Евланов Е.Н., Мухин Л.М. и др. (Fomenkova M.N., Evlanov E.N., Mykhin L.M. et al.) Chemical composition and properties of comet Halley dust particles as obtaind during Vega mission // Astr. And Program 52nd Ann. Meet Meteorit. Soc., Vienna, July 31–Aug. 4, 1989. Houston, 1989. P. 63.
- *Цицин Ф. А.* Загадка происхождения комет: новый взгляд? // Астрон. календарь 1994. –М.: Наука, 1993. С. 207–219.
- *Цицин Ф.А.* Происхождение комет: новый взгляд на старую проблему // Земля и Вселенная. −1999. № 1. С. 60–69.
- *Цицин* Ф. А. Проблемы изучения кометно–астероидного материала за орбитой Юпитера. // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. М.: Космоинформ, 2000. С. 28–42.

- *Цицин Ф. А., Расторгуев А. С., Чепурова В. М.* Динамическая эволюция космогонически исходного ансамбля кометных тел Солнечной системы // Астрон. цирк. 1985. № 1408. С. 5–8.
- *Цицин Ф. А., Чепурова В. М., Расторгуев А. С.* Кометы и Галактика // Астрон. цирк. -1984. № 1310. C. 5-6.
- *Чеботарев* Γ .*А*. О границах Солнечной системы // Астрон. журн. -1964. № 5- С. 983-989.
- *Чеботарев Г.А.* Поиски трансплутоновых планет с помощью периодических планет // Бюлл. ИТА. 1972. Т.13. № 3. С.145—147.
- *Чепурова В. М., Расторгуев А. С., Цицин* Φ *. А.* О возможном источнике короткопериодических комет // Астрон. цирк. 1985. № 1378. С. 1–4.
- Чепурова В.М., Шершкина С.Л. Влияние сильнодействующих взаимодействий на эволюцию внешних слоев облака Орта // Кинематика и физика небесных тел. 1989. Т. 5. № 4. С. 82–87.
- *Чурюмов К.И.* Послесловие к спектаклю // Звездочет. 1996. № 8. С. 10—13.
- *Шмидт О.Ю.* О происхождении комет // ДАН СССР. 1945. Т. 49. № 6. С. 413–416.
- *Шор В.А.* Происхождение малых планет / Малые планеты. М.: Наука, 1973. С. 283-333.
- *Шульман Л.М.* Состав кометного ядра. Космогонический подход. Препринт ИКИ АН СССР. М., 1983. 19 с.
- Anderson. NASA scientist believes a tenth planet may exist in Solar System // Space Age times. 1987. V. 14. № 5–6, 22–23.
- *Bailey M.E.* The mean energy transfer rate to comets in the lort cloud and implications for cometary origins // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. -1986. -V. 218. -N0 1. -P. 1-30.

- Bailey M.E., Emel'yanenko V.V. Dynamical evolution of Halley-type comets // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1996. V. 278. P. 1087–1110.
- Bailey M.E., Stagg C.R. Cratering constraints on the inner Oort cloud: Steady State model // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1988. V. 235. № 1. –P. 1–32.
- *Bandermann L.*W., Wolstencroft R.D. Monthly Notices Roy. Astron. Soc. -1970. V. 150. № 173.
- Biermann L. Dense interstellar clouds and comets // Astron. Pap. Dedicated Bengt Strömgren. Symp. Copenhagen, 1978. P. 327-336.
- Callandrean C. Etude sur la Theorie des cometes periodiques // Ann. Obs., Paris. Mem. 1892. V. 20. P. 1–64.
- Cameron A.C.W. Formation of the Solar Nebula// Icarus. -1963. V. 18. No 1. P. 339-342.
- Carussi A., Kresak L., Perozzi E., Valsecchi G. Long-term evolution of short-period comets. Adam Hilder Ltd., Bristol and Boston., 1986.
- Carussi A., Valsecchi G. Dynamical evolution of short–period comets. // Publ. Astron. Inst. Czechosl. Acad. Sci. 1987. № 67. P. 21–28.
- Clube S.V.M., Napier W.M. Comet formation in molecular clouds // Icarus. 1985. V. 62. P. 384-388.
- Cooke A., Wickramasinghe N.C. Polyformaldehyde grains // Far Infrared Astron. Proc. Conf., Windsor. Oxford, 1976. P. 277-280.
- Corlin A. On the Origin of comets // Bergetrand Festrift. 1938. P. 277–280.
- *Davis M.*, *Hutt P.* Extinction of species by periodic comet Showers // Nature. -1984. V. 308. № 5961. P. 715-717.

- *Donn B.* Comets, Interstellars Clouds and star Clusters // IAU Coll. 1976. № 25. P. 663-670.
- *Drobyshevski E.M.* The young long–period comet family of Saturn // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2000. V. 315. P. 517–520.
- Edgeworth K.E. The Origin and Evolution of the Solar System // Mountly Notices of R.A.S. 1949. V. 109. № 5. P. 600–615.
- Emel'yanenko V.V, Asher D.J., Bailey M.E. Centaurs from Oort cloud and the origin of Jupiter–family comets // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2005. 361. P. 1345–1351.
- Emel'yanenko V.V, Bailey M.E. The capture of Halley-type and Jupiter-family comets from the near-parabolic flux //Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies. 1997. P. 159–164.
- Everhart E. Origin and evolution of comets // Symp. Origine. Syst. Solaire. Nice. Paris. 1972a. P. 302–304.
- Everhart E. The Origin of Short–Period Comets // Astrophysical. 19726. V. 10. P. 131.
- Everhart E. The evolution of comet orbits // IAU Coll. 1976. N_{\odot} 25. P. 445–461.
- Fayet E. Comptes rendus Acad. Sci. 1886. V. 106. P. 1073–1080.
- Fellgett P. Origin and nature of comets // Observatory. 1977. V. 97. N = 1016. P. 23-25.
- Fernandez J.A. Dynamical capture and physical decay of short-period comets // Icarus. $-1985. V. 64. N_{\odot} 2. P. 308-309.$
- Fernandez J.A., Ip W.-H. On the time evolution of the cometary influx in the region of the terrestrial planets // Icarus. -1983. V. 54. No 3. P. 377-387.
- *Gauβ K.* Göttingische gelehrte Anzeigen. 1813. 8. S. 873–880.

- *Greenberg J.* Coagulated interstellar dust as the basic ingredient of comets and carbonaceous chondrites // Междунар. геол. конгр. Москва 4-14 авг. 1984. Тез. докл. Т.5. Секц. 10-11. 1984. Р. 279.
- Holman M.J., Wisdom J. Dynamical stability of the outer solar system and the delivery of short-period comets // Astron. J. 1993. V. 105. P. 1987-1999.
- Hutt P., Alvarez W., Elder W.P. et al. Comet Showers as a cause of mass extinctions // Nature. − 1987. − V. 329. − № 6135. − P. 118-126.
- *Hills J.G.* On the process in the formation of the planets and comets // Icarus. $-1973. V.18. N_{\odot} 3. P. 505-522.$
- Hills J.G. Comet showers and the steady–state infall of comets from the Oort cloud // Astron. J. 1981. V. 86. № 11. P. 1730–1740.
- *Hoyle F., Littleton R.A.* The effect of interstellar matter on climatic variation // Proc. Camb. Phil. Soc. 1939. V. 35. P. 405-415.
- *Ipatov S.J., Mather J.C.* Migration of trans–Neptunian objects to the terrestrial planets. // Earth, Moon and Planets. 2003. 92. P. 89–98.
- *Irwin M., Tremaine S., Zitkon A.N.* A search for slew–moving objects and the luminosity function of the Kuiper belt //Astron. J. 1995. 10. P. 3082–3092.
- Jewitt D., Lun J., Chen J. The Manna-Cerro-Tololo (MKCT) Kuiper belt and Centaur survey // Astron. J. 1996. V. 112. P. 1225-1238.
- *Kamienski M.* Orbits Komety Wolf 1 I jej quasi–fluktuacje// Postepy astronomi. 1954. V. 2. №. 3. P. 137–143.
- *Kresak L.* The bias of the distribution of cometary orbits by observation selection // Bull. Astron. Inst. Czechosl. -1975. V. 26. N 2. P. 92-111.

- *Kuiper G.P.* On the origin of the Solar system // Astrophysics, Ed J. A. Hynek, McCraw –Hill, Co.Inc. 1951. P. 357–424.
- Lagrange J.L. Sur l'origine des cometes // Additions a la connaissance des Temps pour. 1812. P. 381–395.
- *Laplage P.S.* Exposition du Systeme du Monde // Paris,1796. Ed. 1–5.
- Levison H.F., Dones L., Duncan M.J. The origin of Halley-type comets: Probing the inner Oort cloud // Astron. J. 2001. 121. P.2253–2267.
- Lindsay J.F., Srnka L.J. Galactic dust lanes and lunar soil // Nature. 1975. V. 257. P. 776-778.
- Luu J. Enlarging the Solar system: the Kuiper Belt // Completing the Inventory of the Solar System ASP Conference Series. 1996. V. 107. P. 245-254.
- Lyttleton R.A. The comets and their Origin // Cambridge Univ. Press. 1953. 143 p.
- Lyttleton R.A. On The Distribution of simimajor axis long–period comets // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. − 1968. − V. 139. − № 2. − P.225–230.
- *Marsden Br.G.*, *Williams G. V.* Catalogue of Cometary Orbits 1992. Cambridge, 1992. 100 p.
- *Marsden Br.G.*, *Williams G. V.* Catalogue of Cometary Orbits 1998. Cambridge, 1998. 100 p.
- *Marsden B. G., Williams G. V.* Catalogue of Cometary Orbits 2003, 15th Ed. Cambridge, 2003. 152 p.
- *Marsden B. G.*, *Williams G. V.* Cataloque of Cometary Orbits, 16th edition. Cambridge, 2005. 207 p.
- Matese J.J., Whitman P.G., Whitmire D.P. Cometary evidence of a massive body in the outer Oort cloud // Icarus. 1999. V. 141. № 2. P. 354–366.

- *McCrea W.H.* Solar System as space-probe // Observatory. 1975. V. 95. P. 239-255.
- Napier W.M., Wickramasinghe J.T., Wickramasinghe N.C. Extreme albedo comets and the impact hazard //Mon. Not. R. Astron. Soc. 2004. № 355. P.191–195.
- *Newton H.A.* On the Origin of Comets // Amer. J. Sci. and Arts. New Haven. Conn. 1878. Ser. 3.16(116). P.165–179.
- *Newton H.A.* On the capture of comets // Mem. Nat. Acad. Sci. 1891. V. 1. P.55–63.
- O'Dell C.R. Nature of particulate matter in comets as determined from infrared observations // Astrophys. J. 1971. V. 166. № 4. P.675-681.
- *Oja H.* Perihelion distribution of near–parabolic comets // Astron. and Astrophysic. 1975. V. 43. № 2. P. 317–319.
- Oort J.H. The Structure of the Cloud of Comets surrounding the Solar System and a Hypothesis concerning it's Origin // Bull. Astron. Inst. Netherl. 1950. V. 11 P. 91–110.
- Oort J.H. Origin and Development of Comets // Observatory. 1951. V. 71. P. 120–147.
- *Ridley H. B.* Comets. Presidential address 1977 // J. Brit. Astron. Assoc. -1978. V. 88. No 3. P. 326-347.
- *Schiaparelli G.V.* Entwurf einer astronomischen Theorie der Sternschuppen// Siebente Note. –1871. S. 261.
- Schuette C.H. Two new families of comets // Pop. Astron. $-1949. V.57. N_{\odot} 4. P. 176-182.$
- Schulhof L. Sur les grandes perturbations des cometes periodiques // Bull. Astron. Paris. 1891. V. 8. P. 147–157.
- Schütte K. Drei weitere Mitglieder der Transplutokometenfamilie // Acta Astronomica. 1965. V. 15. № 1. P. 11–13.

- *Tancredi G., Rickman H.* The evolution of Jupiter family comets over 2000 years // Chaos. Resonance and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System. 1992. V. 152. P. 269–274.
- Tisserand F. Traite' de Mecanique Celeste. Paris, 1896. V. 4. № 12.– P. 198–216.
- Van den Bergh S. Giant molecular clouds and the Solar System comets // I. Roy. Soc. Astron. Soc. Can. 1982. V. 76. № 5. P. 303–308.
- *Weissman P.R.* Stellar perturbations of the cometary cloud // Nature. -1980. V. 288. № 5788. P. 242-243.
- *Weissman P.R.* The Kuiper Belt // Annu. Rev.Astron. Astrophys. 1995. P. 327-357.
- Whipple F.L., Lecar M. Comet Formation Induced by the Solar Wind // IAU Coll. -1976. -V. 2. N 25. P. 660.



О. В. Калиничева, В. П. Томанов Динамическая связь комет с планетами

Редподготовка – Ю. С. Кудрявцева Оригинал-макет – О. В. Калиничева

Подписано к печати 20.11.2008. Формат $60x84\ 1/16$ Бумага писчая Усл. печ. л. 11.2. Уч.-изд. л. 9.5 Тираж $100\$ экз.

160035, Вологда, ул. С.Орлова, 6, ВГПУ, издательство Отпечатано в литографии Северного лесоустроительного предприятия 160014, Вологда, Некрасова, 51