

01.03.01

Е601

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГАО (Пулково)

КОНТРОЛЬНЫЙ
ЭМПЛЯР

На правах рукописи

Емельяненко Наталья Юрьевна

**ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ И КИНЕМАТИКА
КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ В СБЛИЖЕНИЯХ
С ЮПИТЕРОМ**

Специальность 01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент АН Украины
Чурюмов Клим Иванович,

доктор физико-математических наук, профессор
Антонов Вадим Анатольевич,

доктор физико-математических наук
Медведев Юрий Дмитриевич.

Ведущая организация – Институт астрономии РАН, Москва.

Защита состоится 17 апреля 2009 г., в 11 часов 30 минут, на заседании
Диссертационного совета Д 002.120.01 в Главной астрономической обсерватории
Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское
шоссе, д. 65, ГАО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан “ _____ ” марта 2009 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



Милецкий Е.В.

Актуальность работы

Сближения с планетами-гигантами – один из основных факторов изменения орбиты кометы. Вне всякого сомнения, сближения приводят к наибольшим трансформациям элементов орбиты за короткий промежуток времени.

Главная проблема – нельзя предвидеть результат сближения: орбита кометы может измениться до неузнаваемости с катастрофическим перебросом афелия от орбиты Юпитера до границ планетной области или практически не измениться при одних и тех же значениях минимального йовицентрического расстояния в области сближения. То есть предложенная в середине прошлого века Е.И. Казимирчак-Полонской классификация сближений по минимуму не достаточна. Очень тесное сближение с Юпитером и, тем более, с другой планетой-гигантом – чрезвычайно редкое явление. Поэтому до настоящего времени нет научно обоснованной классификации тесных сближений. Актуальная задача – уточнение классификации Е.И. Казимирчак-Полонской, поиск дополнительных параметров для научно обоснованной классификации сближений.

В последней четверти 20-го века были открыты кометы с высоким значением постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Первые же исследования эволюции орбит этих комет показали, что они испытывают необычные сближения с планетой. Эти сближения были названы низкоскоростными из-за меньшей йовицентрической скорости кометы в области сближения. Но помимо низкоскоростных, эти кометы испытывают и обычные сближения (их стали называть высокоскоростными). Так как высокое значение постоянной Тиссерана не гарантирует комете только низкоскоростные сближения, актуальная проблема – поиск четких научно обоснованных определений низкоскоростных и высокоскоростных сближений. Выделение параметров гелиоцентрической орбиты, приводящих к определенному классу сближений, позволяет тщательно исследовать сближения и все их особенности.

Как показано, в частности, в нашей работе, кометы с высоким значением постоянной Тиссерана испытывают много сближений с Юпитером на небольшом

промежутке времени, то есть у них происходит быстрая эволюция орбит по сравнению с остальными кометами. Этот фактор дает уникальную возможность изучения, интерпретации и построения схем эволюции орбит, классификации, моделирования сближений и проверки моделей на большом количестве сближений наблюдаемых комет. Поэтому исследование комет с низкоскоростными сближениями – актуальная задача кометной астрономии.

Открытие и исследование низкоскоростных сближений – прорыв в решении многих проблем, связанных с эволюцией орбит и сближениями комет с планетами.

Определенная часть низкоскоростных сближений сопровождается целым рядом особенностей. В области сближения эти кометы выходят на оскулирующие эллиптические йовицентрические орбиты [временный спутниковый захват (ВСЗ) в смысле Эверхарта]. Обычно среди причин, вызывающих данную особенность, называют низкую йовицентрическую скорость кометы в ближайшей окрестности Юпитера. Но подобная особенность очень часто фиксируется на границах области сближения, а иногда и между сближениями. Еще одна особенность – кратные минимумы функции йовицентрического расстояния (КМ). После открытия этого явления обычно их связывали с выходом кометы на временную спутниковую орбиту с неоднократным обходом вокруг Юпитера. Но в большинстве случаев кратные минимумы появляются во время сближения без ВСЗ, йовицентрические траектории комет не имеют ничего общего со спутниковыми орбитами, вторичные минимумы часто располагаются на расстояниях порядка двух, трех и даже более астрономических единиц (а.е.). Минимумы происходят на одном обращении кометы вокруг Солнца, а обход кометы вокруг Юпитера в большинстве сближений с КМ отсутствует. Менее удивительной особенностью является реверсия линии апсид, так как это явление наблюдается и у других комет семейства Юпитера, комет галлеевского типа и долгопериодических комет в окрестностях тесного минимума. Но реверсии линии апсид комет с высоким значением постоянной Тиссерана отличаются тем, что происходят не только в

очень тесных, но и в умеренных сближениях. Заслуживает изучения и то обстоятельство, что кометы с высоким значением постоянной Тиссерана испытывают реверсии не обязательно в окрестностях минимумов. Обнаружены сближения, сопровождающиеся множественными реверсиями в одном сближении. Итак, имеются многочисленные новые явления, возникающие в сближениях комет с Юпитером. Актуальная проблема – изучение и объяснение всех особенностей сближений комет с высоким значением постоянной Тиссерана, построение моделей сближений, приводящих к этим особенностям.

Принципиальная научная проблема состоит в том, что не существует единого подхода к описанию всех известных особенностей низкоскоростных сближений. Поэтому отсутствует возможность предсказать какие-либо неизвестные пока особенности или объяснить редко встречающиеся явления.

В последнее время открыты транснептуновые объекты, которые большинством ученых рассматриваются как основной источник комет семейства Юпитера. Согласно современным воззрениям, низкоскоростные сближения с планетами играют определяющую роль в процессе перехода этих объектов из внешней части Солнечной системы в околоземное пространство. Поэтому исследование этих явлений является чрезвычайно важным для изучения процесса миграции малых тел в Солнечной системе. Хорошо известно, что особенности сближений комет с планетами-гигантами – определяющий фактор в схемах захвата комет из облака Оорта. Проблема тесных сближений объектов с высоким значением постоянной Тиссерана очень актуальна и при рассмотрении соударения малых тел с планетами. В 1994 году такое соударение было впервые рассчитано заранее и ярко продемонстрировано в последнем сближении с Юпитером кометы Шумейкер–Леви 9. Феномен этой кометы показал, что проблема тесного сближения малого тела с планетой связана с оценками катастрофических явлений и кратерообразования на планетах. Очевидно, что многие астероиды, сближающиеся с Землей, имеют значение постоянной Тиссерана, близкое к трем относительно Земли, то есть они могут испытывать

низкоскоростные сближения с нашей планетой. Таким образом, рассматриваемая задача актуальна в проблеме кометно-астероидной опасности для Земли.

Так как с позиций небесной механики нет принципиальных отличий между сближениями объекта с любой большой планетой, актуальной проблемой является изучение комет семейства Юпитера с высоким значением постоянной Тиссерана как части объектов Солнечной системы, испытывающих низкоскоростные сближения.

Уже многие годы остается актуальной возможность захвата кометы планетой-гигантом. В настоящее время все гипотезы перехода малого тела в семейство спутников Юпитера в качестве первой фазы требуют временный гравитационный захват (ВГЗ) планетой – наличие эллиптических планетоцентрических элементов внутри сферы Хилла. Только наблюдаемые кометы с высоким значением постоянной Тиссерана испытали ВГЗ. Исследование динамической эволюции всех комет с ВГЗ необходимо для выяснения обстоятельств и механизма этого процесса. В нашей работе изучены 9 наблюдаемых комет, испытавших ВГЗ в 20-ти сближениях с Юпитером.

После открытия в 1993 г. такого феноменального явления, как распавшаяся комета Шумейкер–Леви 9 с ее трагическим финалом, остается актуальным изучение последнего сближения с Юпитером этой кометы (ВГЗ ядер кометы Шумейкер–Леви 9 подтвержден всеми исследователями кометы). Поиск возможных аналогов в прошлом, анализ динамической эволюции комет-кандидатов на подобное явление в будущем – актуальная задача наших дней. Изучение эволюции орбит ядер этой кометы актуально, так как вопрос о том, что собой представляла орбита кометы Шумейкер–Леви 9 до сближения с Юпитером, остается открытым.

Цели работы

1. Расчет и анализ орбитальной эволюции наблюдаемых комет с высоким значением постоянной Тиссерана относительно Юпитера на 800-летнем промежутке времени.

2. Выявление основных закономерностей эволюции. Поиск удобного представления эволюции орбиты как отдельной кометы, так и групп комет.
3. Тщательное изучение и статистический анализ особенностей сближений с Юпитером.
4. Усовершенствование методики изучения эволюции орбит и ее применение для комет семейства Юпитера с высоким значением постоянной Тиссерана.
5. Усовершенствование классификации сближений, определение низкоскоростного и высокоскоростного сближений.
6. Качественный анализ низкоскоростных сближений.
7. Разработка моделей низкоскоростного сближения для объяснения всех его особенностей.
8. Исследование особенностей низкоскоростных сближений наблюдаемых комет в свете предложенных моделей.
9. Анализ сближений наблюдаемых комет с ВСЗ в сфере Хилла.
10. Анализ динамической эволюции (в прошлом) 19 ядер кометы Шумейкер–Леви 9 в ее последнем сближении с Юпитером.

Научная новизна работы

В данной работе делается первая попытка моделирования низкоскоростного сближения. Предложенные модели описывают все известные особенности таких сближений у наблюдаемых комет. Простые модели не только демонстрируют явления временного спутникового захвата, кратные минимумы функции йовицентрического расстояния, реверсии линии апсид и некоторые другие особенности сближений. Они позволяют объяснить широкий диапазон основных параметров, характерных для этих явлений, таких как: длительность ВСЗ, йовицентрическое расстояние, на котором он возникает, положение участка ВСЗ относительно минимума, причины ВСЗ в сфере Хилла с КМ или без них; причины КМ на больших йовицентрических расстояниях, геометрические и физические кратные минимумы; большой разброс йовицентрических расстояний в реверсиях

линии апсид, несовпадение по времени наступления реверсии и минимума, отсутствие реверсии во многих самых тесных сближениях.

Впервые развит единый подход к объяснению всех особенностей низкоскоростного сближения в рамках парной задачи двух тел: Солнце – Юпитер, Солнце – комета.

В данной работе впервые решены следующие научные, методические и практические задачи:

1. Проведен статистический и качественный анализ всех сближений с Юпитером для 97 наблюдаемых комет на 800-летнем промежутке времени.

2. Выделены и обоснованы шесть эволюционных состояний изученных комет: A_l , P_l , A_m , P_m , A_h , P_h . Показано, что кометы с высоким значением постоянной Тиссерана могут находиться в четырех состояниях: A_l , P_l , A_m , P_m .

3. Предложено представлять эволюцию орбиты отдельно взятой кометы в виде графа состояний.

4. Проведен количественный и качественный анализ частот пребывания в эволюционных состояниях для каждой изученной кометы и для групп комет.

5. Показано, что кометы с высоким значением постоянной Тиссерана испытывают циклические преобразования орбит.

6. Для 97 комет введены эволюционные схемы (графы состояний), по которым они эволюционируют.

7. На 800-летнем промежутке времени проведен статистический и качественный анализ всех сближений с такими особенностями как реверсия линии апсид, ВСЗ, ВГЗ, КМ.

8. Даны научно обоснованные определения точек низкоскоростного касания орбит, низкоскоростного касательного участка на орбите кометы, высокоскоростного и низкоскоростного сближений.

9. Разработаны 8 моделей низкоскоростных сближений, отличающиеся начальными условиями [положением орбиты на плоскости (a, e)]. Модели позволили объяснить все особенности сближений.

10. Изучен временный спутниковый захват девяти наблюдаемых комет в сфере Хилла. Показано, что движение этих комет было неустойчиво по Хиллу.

11. Исследована динамическая эволюция 19 ядер кометы Шумейкер–Леви 9 (в прошлом) в свете предложенных моделей. Показано, что до сближения эта комета находилась на орбите с небольшим эксцентриситетом и афелием, расположенным в ближайшей окрестности орбиты Юпитера. Перед трагическим финалом она испытала сильное низкоскоростное сближение, была захвачена на орбиту спутника Юпитера (испытала ВГЗ с физическими кратными минимумами), распалась на множество ядер, которые столкнулись с планетой в окрестности перийовия, как только он оказался меньше радиуса Юпитера.

Научная, методическая и практическая значимость

Научное значение имеют разработанные модели низкоскоростных сближений. Каждая модель обладает уникальными особенностями, проявляющимися при определенных начальных условиях сближения. Некоторые особенности еще не обнаружены у наблюдаемых комет, но, возможно, они будут открыты при исследовании их более долговременной эволюции или в сближениях с Юпитером пока неоткрытых комет. Модели сближений могут быть применены к другим планетам и другим малым телам Солнечной системы.

Отдельную научную значимость имеют:

– результаты статистического и качественного анализа низкоскоростных сближений и их особенностей;

– результаты исследования временного спутникового захвата наблюдаемых комет в сфере Хилла;

– результаты исследования последнего сближения с Юпитером кометы Шумейкер–Леви 9.

Научное и методическое значение имеет разработанная и реализованная методика исследования эволюции орбиты и низкоскоростного сближения кометы с высоким значением постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Методическое значение имеют: усовершенствованная классификация сближений

по глобальному минимуму; научно обоснованное разделение сближений на низкоскоростные и высокоскоростные; впервые рекомендуемое представление эволюции орбиты отдельной кометы в виде графа состояний. Такое представление может быть применено при изучении эволюции орбиты любого малого тела Солнечной системы. Методическое значение имеет разработанная эволюционная схема комет с высокими значениями постоянной Тиссерана.

Полученные в работе результаты могут найти применение во всех астрономических учреждениях, где изучается динамическая эволюция комет, в частности, в Институте астрономии РАН, Институте прикладной астрономии РАН, на кафедре астрономии Казанского госуниверситета, на кафедрах небесной механики Московского, Санкт-Петербургского, Южно-Уральского и Томского госуниверситетов, а также в зарубежных институтах и обсерваториях.

Результаты, выносимые на защиту

1. Разработанная методика изучения эволюции орбит комет семейства Юпитера с высоким значением постоянной Тиссерана.

2. Статистический и качественный анализ орбитальной эволюции 97 комет семейства Юпитера.

3. Восемь моделей сближения кометы с Юпитером, объясняющих все особенности низкоскоростных сближений и их комбинации.

4. Изученные особенности динамики наблюдаемых комет в низкоскоростных сближениях с Юпитером:

реверсия линии апсид и временный спутниковый захват в смысле Эверхарта (ВСЗ) происходят в окрестностях точек низкоскоростного касания орбит;

в подавляющем большинстве случаев кратные минимумы (КМ) функции йовицентрического расстояния вызываются геометрией сближения – это геометрические кратные минимумы (ГКМ);

движение комет во время ВГЗ (временный гравитационный захват как ВСЗ в сфере Хилла) было неустойчиво по Хиллу, но в одиннадцати сближениях сопровождалось физическими кратными минимумами (ФКМ);

ВГЗ кометы Шумейкер–Леви 9 в окрестности точки пересечения орбит кометы и Юпитера; два вида финальных орбит (в прошлом) ядер как следствие первоначального разделения кометы на две части в первом минимуме сближения.

Апробация работы

Основные результаты диссертации изложены автором на следующих конференциях:

Международной конференции “САММАС” (Украина, Винница, 1999, 2008).

Конференции, посвященной 100-летию АОЭ (Россия, Казань, 2001).

Международной конференции “ASTROECO–2002” (Россия, Терскол, 2002).

Международной астрономической конференции “Основные направления развития астрономии в России” (Россия, Казань, 2004).

Всероссийской астрономической конференции (Санкт-Петербург, 2001; Москва, 2004; Казань, 2007).

Международной конференции “Околосемная астрономия “ (Россия: Терскол, 2003; Казань, 2005; Терскол, 2007).

Всероссийской конференции “Астероидно-кометная опасность–2005” (Санкт-Петербург, 2005).

Генеральной ассамблеи МАС, симпозиум № 236 (Чехия, Прага, 2006).

На ежегодных Итоговых конференциях ЮУрГУ (Челябинск, 1996–2008).

На научных семинарах кафедр: математического анализа, теоретической механики, вычислительной и небесной механики ЮУрГУ (Челябинск, 1996–2008).

На научных семинарах Института астрономии РАН, Института прикладной астрономии РАН, кафедры небесной механики Санкт-Петербургского университета, отделов небесной механики и астрометрии Главной астрономической обсерватории РАН (Пулково), отделения небесной механики и астрометрии Астрономического института имени Штейнберга при Московском государственном университете (2008).

По результатам диссертационной работы опубликованы 32 статьи.

Объем работы

Диссертация состоит из Введения, 5 Глав, Заключения, Списка цитируемой литературы, включающего 244 источника, Приложения. Работа изложена на 349 страницах, включая 230 страниц машинописного текста, 57 рисунков, 40 таблиц, четыре из которых помещены в Приложение.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования; сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту; отмечены результаты, полученные впервые.

Глава 1 посвящена краткому обзору развития кометной астрономии, описанию предмета предстоящих исследований – наблюдаемым кометам; истории открытия низкоскоростных сближений с Юпитером и их особенностей; изложению метода изучения динамической эволюции орбит комет.

В данной работе при совместном численном интегрировании дифференциальных уравнений движения кометы и восьми больших планет применялся интегратор Е. Эверхарта RADAU [1] из пакета MERCURY [2]. Точность вычислений и порядок аппроксимирующего полинома полагались равными $LL = 8$, $NOR = 15$, а координаты, скорости и массы планет соответствовали эфемериде DE403 [3]. Использовались элементы орбит комет из каталога Б. Марсдена, Д. Вильямса [4].

В **Главе 2** исследуется динамическая эволюция орбит 97 комет семейства Юпитера на промежутке времени $(t_1 - t_2)$, где t_1 – начало первого, t_2 – конец последнего сближения каждой кометы с Юпитером в ее 800-летней эволюции; t_0 – эпоха оскуляции первого появления кометы. Для этих комет в момент времени t_0 была вычислена постоянная Тиссерана относительно Юпитера по формуле:

$$T_C = \frac{a_J}{a} + 2 \sqrt{\frac{a}{a_J} (1 - e^2)} \cos i. \quad (1)$$

По значению величины T_C кометы были разделены на две группы:

$$T_C \geq 2.85 \text{ (первая группа из 84 комет);} \quad (2)$$

$$2.59 \leq T_C < 2.85 \text{ (вторая группа из 13 комет).} \quad (3)$$

Кометы, удовлетворяющие условию (2) – это все кометы с высоким значением постоянной Тиссерана из каталога [4]. Кометы, удовлетворяющие условию (3) – это кометы с самыми тесными сближениями с Юпитером среди всех известных комет с подобными орбитами.

Пересмотрены понятия области, длительности и классификации сближений по глобальному минимуму функции йовицентрического расстояния. Проведен анализ распределения элементов орбит исследованных комет в прошлом и будущем. Введены шесть эволюционных состояний кометы по положению апсидальных точек относительно орбиты Юпитера и эксцентриситету орбиты кометы. Рекомендована краткая запись эволюции орбиты кометы в виде графа состояний. Рассмотрены каскадные переходы в эволюционных состояниях орбит. Разработаны эволюционные схемы для комет первой и второй групп. Проведен статистический анализ сближений.

В **Главе 3** проводится качественный анализ сближений наблюдаемых и модельных комет в рамках парной задачи двух тел (Солнце – комета, Солнце – Юпитер).

В § 3.1 введены понятия точек низкоскоростного касания орбит кометы (M) и Юпитера (M'), минимальной йовицентрической скорости и низкоскоростного касательного участка; даны определения низкоскоростного и высокоскоростного сближений.

Пусть V , V' – модули векторов гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера; V_j – модуль вектора йовицентрической скорости кометы

Точки M и M' назовем **точками низкоскоростного касания орбит**, если в момент времени t_M (момент касания орбит) векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера равны:

$$V \parallel V', \quad (4)$$

$$V = V'. \quad (5)$$

Точное выполнение одного из условий (4, 5) и приближительное выполнение другого в некоторый момент времени t_M приведет к тому, что в этот момент времени величина V_j будет иметь минимум.

Точки M_i на кометной орбите, в которых имеет место условие (5), а условие (4) выполняется приближительно (настолько, что позволяет величине V_j иметь минимум), назовем *точками минимальной йовицентрической скорости*.

Окрестность точки низкоскоростного касания орбит (точки минимальной йовицентрической скорости) назовем *низкоскоростным касательным участком орбиты кометы* [на нем приближительно выполнены оба условия (4, 5)].

Сближение назовем *низкоскоростным*, если в области сближения имеется хотя бы один низкоскоростной касательный участок.

Сближение назовем *высокоскоростным*, если в области сближения нет ни одного низкоскоростного касательного участка.

В § 3.2 определены полярные орбитальные координаты точки низкоскоростного касания на орбите кометы (r_M, v_M) .

Пусть S, J и c – Солнце, Юпитер и комета; r_J, a_J и r_M, a_c – радиус-векторы и большие полуоси Юпитера и кометы в точке низкоскоростного касания их оскулирующих орбит на каждом шаге интегрирования. Вычислим (r_M, v_M) по формулам:

$$r_M = \frac{2}{\frac{1}{a_c} - \frac{1}{a_J} + \frac{2}{r_J}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_M = \arccos \frac{(p - r_M)}{er_M} \\ 0 \leq v_M \leq \pi, \end{cases}, \quad (7)$$

если угол v_M отсчитывается от перигелия (для орбит, у которых точка M находится на перигелийной части орбиты).

Если угол v_M отсчитывается от афелия (для орбит, у которых точка M находится на афелийной части орбиты), формула (7) примет вид:

$$\begin{cases} v_M = 180 - \arccos \frac{(p - r_M)}{er_M}, \\ 0 \leq v_M \leq \pi, \end{cases} \quad (8)$$

Замечание 1. Вычисляя на каждом шаге интегрирования не только оскулирующие элементы гелиоцентрической орбиты: $a, e, E, i, q, \omega, \Omega$, но и полярные орбитальные координаты кометы (r_c, v_c) , и точки касания $M(r_M, v_M)$ на орбите кометы, легко определяем момент прохождения кометой этой точки (или точек, так как в области сближения их может оказаться несколько).

Замечание 2. Подчеркнем еще раз, что мы вычисляем координаты (r_M, v_M) на орбите кометы одновременно с интегрированием полных дифференциальных уравнений движения (учитываются возмущения от всех планет, несферичности фигуры Юпитера и [через радиус-вектор Юпитера r_J в формуле (6)] эллиптичность его орбиты).

В § 3.3 получены формулы для прямоугольных гелиоцентрических координат точки касания $K(X_K, Y_K)$ на круговой орбите Юпитера радиуса a' .

Пусть в момент времени t_M комета находится в точке касания орбит M . Условие (4) будет выполнено, если точка $K(X_K, Y_K)$ имеет координаты:

$$\begin{cases} X_K = \frac{a' \sqrt{1 - e^2} \cos E_M}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 E_M}}, \\ Y_K = \frac{\sin E_M a'}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 E_M}}. \end{cases} \quad (9)$$

Замечание 1. Как и следовало ожидать, решения (9) дают две точки касания на орбите Юпитера. В выбранной системе координат для точек K_1 и K_2 изменяется знак ординаты ($\sin E_M < 0$, если $\pi < E_M < 2\pi$).

Замечание 2. Обратим внимание на то, что для двух комет вида A и P с одинаковыми эксцентриситетами e и эксцентрисическими аномалиями E_M на круговой орбите Юпитера существует одна и та же точка $K(X_K, Y_K)$, в которой векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера равны (для орбит с афелием в окрестности орбиты Юпитера угол E_M отсчитывается от точки афелия).

В § 3.4 рассмотрены низкоскоростные сближения как следствие специфических размеров и формы орбиты кометы. На плоскости (a, e) выделена область ω – область комет с особенностями в сближениях с Юпитером.

Легко показать, что абсолютная величина радиус-вектора точек низкоскоростного касания орбит M_i ($i = 1, 2$), в которых выполнено условие (5), находится по формуле:

$$r_M = \frac{2aa'}{a+a'} \quad (10)$$

(в силу симметрии орбиты кометы относительно линии апсид в общем случае на ней имеются две такие точки M_1 и M_2).

Для того, чтобы точки M_i принадлежали области сближения, как минимум, они должны быть расположены не далее, чем на 2 а.е. от орбиты Юпитера по радиус-вектору кометы, то есть орбиты комет должны удовлетворять условию:

$$2.31 \leq a \leq 11.7 \text{ а.е.} \quad (11)$$

Так как $q \leq r_M \leq Q$, орбиты комет, содержащие точки M_i , должны удовлетворять условию:

$$\frac{|a' - a|}{a' + a} \leq e < 1 \quad (12)$$

Условия (11, 12) задают на плоскости (a, e) некоторую конечную область Ω (рис. 1). Функция $e = e(a)$, ограничивающая область Ω снизу, определена и непрерывна при условии (11) и имеет единственный экстремум-минимум: $e_{min}(a = 5.2028 \text{ а.е.}) = 0$. Ее график – это линия $A_i J P_i$ на рис. 1.

Орбиты всех наблюдаемых комет первой группы, изученных в этой работе, удовлетворяют условию (2). Запишем постоянную Тиссерана в этом условии в виде:

$$\frac{a'}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a'}(1-e^2)} \geq 2.85$$

и изобразим на плоскости (a, e) область орбит T , удовлетворяющих условию:

$$e \leq \sqrt{1 - \frac{a'}{4a} \left(2.85 - \frac{a'}{a} \right)^2}. \quad (13)$$

Функция $e = e(a)$ (13) определена и непрерывна при условии (11) и имеет единственный экстремум-минимум: $e_{\min}(a = 5.48 \text{ а.е.}) = 0.38$. График функции – это линия T_1TT_2 на рис. 1. Область орбит T , удовлетворяющих условию (2), находится между линией T_1TT_2 и осью абсцисс a ; причем она не ограничена слева и справа по оси a . Ограничим область Ω сверху линией T_1TT_2 . Часть области Ω $JA_1T_1TT_2P_1$ обозначим ω . Все кометы первой группы [абсолютное большинство из них имеют сближения с особенностями на промежутке времени $(t_1 - t_2)$] попадают в область ω на 800-летнем интервале. Поэтому в дальнейшем изложении область ω будем называть *областью комет с особенностями в сближениях с Юпитером*.

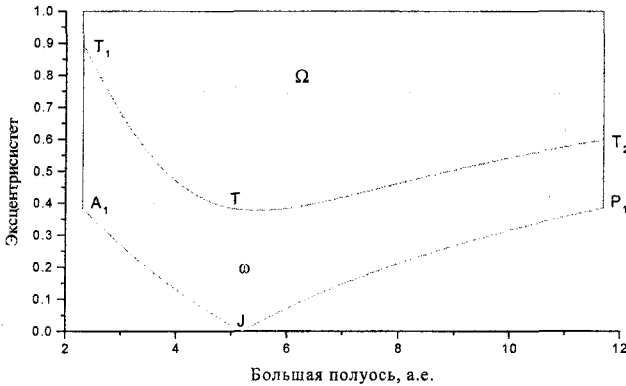


Рис. 1. Области орбит ω , Ω , T на плоскости (a, e)

Сравнение областей орбит T и ω показывает преимущество области ω при поиске объектов с особенностями в сближениях с Юпитером.

В § 3.5 в области ω введены восемь моделей орбит, которые демонстрируют все известные особенности низкоскоростных сближений и их комбинации. Мы выбрали два способа моделирования:

1. Модели с фиксированным положением точек низкоскоростного касания орбит M_i : $A_1, A_2; P_1, P_2$.

2. Модели с фиксированным положением апсидальных точек Q или q : $A_3, A_4; P_3, P_4$.

Совмещаем точки M и Q – получаем модель A_1 , точки M и q – модель P_1 ; точки M_i и I_i (где I_1I_2 – хорда, проходящая через мнимый фокус эллиптической орбиты кометы симметрично относительно линии апсид) – модель A_2 , точки M_i и F_i (где F_1F_2 – фокальная хорда) – модель P_2 . У орбит моделей A_3, P_3 апсидальные точки находятся на круговой орбите Юпитера (для них точки низкоскоростного касания орбит M_i расположены между соответствующей апсидальной и $I_i(F_i)$ точками. У орбит моделей A_4, P_4 апсидальные точки находятся на расстоянии $1a.e.$, соответственно снаружи или внутри от круговой орбиты Юпитера (для них точки низкоскоростного касания орбит M_i расположены между точками b и $I_i(F_i)$ (где b_1b_2 – малая полуось орбиты кометы).

На рис. 2 изображены линии $e_i = e_i(a)$, где $i = 1, 2, \dots, 8$, восьми введенных моделей низкоскоростных сближений. Точки A_i, P_i на линиях e_i ограничивают орбиты с низкоскоростными касательными участками в области сближения.

Рассмотрим кинематику низкоскоростного сближения кометы и Юпитера. Пусть в момент времени T , где:

$$T = T_Q \cup T = T_q. \quad (14)$$

модельная комета находится в ближайшей к орбите Юпитера апсидальной точке и располагается на одном радиус-векторе с Юпитером. Угол α вычисляем из законов Кеплера, записанных для кометы и планеты, находящейся на круговой орбите радиуса a' , по формуле:

$$\alpha = \left| v - (E \pm e \sin E) \left(\frac{a}{a'} \right)^{\frac{3}{2}} \right| \quad (15)$$

(в произвольной точке орбиты кометы α – это угол между направлениями на комету и Юпитер). Вычисляем угол α в опорных точках для всех

эксцентриситетов каждой модели сближения. Углы E и v определяем из уравнения траектории, записанного, соответственно, для эксцентрической и

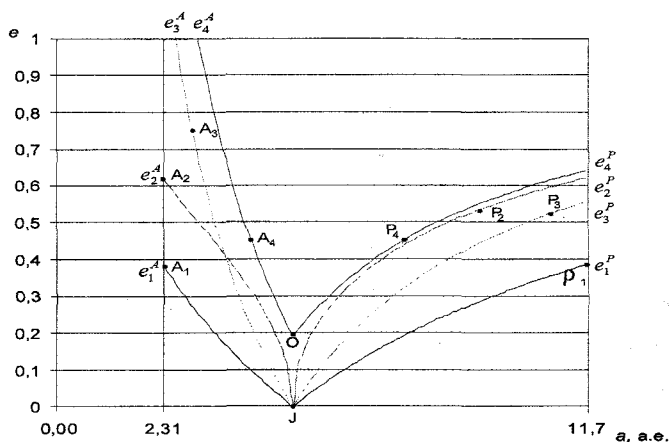


Рис. 2. Область ω и модельные орбиты на ней

истинной аномалий, и значений радиус-вектора кометы в опорных точках. Интерполяцией находим значение угла α между опорными точками, последовательно увеличивая истинную аномалию кометы на 1° от 0° до 180° . Вычисляем радиус-векторы, отношение гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера, йовицентрическое расстояние для всех значений угла α , полученных ранее, по формулам уравнений траектории, гелиоцентрических скоростей и теореме косинусов, которую мы привели к виду:

$$r_j^2 = (r_j^*)^2 + 4ra' \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (16)$$

где $r_j^* = |a' - r|$ — расстояние между орбитами кометы и Юпитера в произвольной точке на орбите кометы по радиус-вектору кометы r .

Итак, все модельные сближения удовлетворяют условиям (14–16).

Исследование моделей показало, что все 8 моделей допускают низкоскоростные касательные участки в области сближения с Юпитером в окрестностях точек M_i . У комет, находящихся на низкоэксцентрических l -орбитах, в окрестностях точек M_i фиксируется временный спутниковый захват в

смысле Эверхарта (ВСЗ). Для моделей A_1, P_1, A_3, P_3 возможен временный гравитационный захват (ВГЗ как ВСЗ в сфере Хилла). Кратные минимумы функции йовицентрического расстояния обнаружены у моделей A_2, P_2, A_4, P_4 .

В Главе 4 подробно описываются 8 моделей орбит низкоскоростных сближений. Для каждой модели дано ее определение и местоположение на плоскости (a, e); рассмотрены изменения размеров и формы орбиты; приведены начальные условия, которым должна удовлетворять орбита кометы для осуществления длительного низкоскоростного апсидального сближения, система уравнений, определяющая взаимные орбитальные положения кометы и Юпитера. Для каждой модели проводится исследование функции r_j на экстремум [определяется положение кратных минимумов (КМ) или устанавливается их отсутствие]. Исследуется возможность ВСЗ у всех введенных моделей; уточняются положения низкоскоростных касательных участков на орбите кометы; вычисляются длительность ВСЗ и постоянная Тиссерана; оценивается возможность ВГЗ; проводится сравнение с наблюдаемыми кометами.

Рассмотрим одну модель низкоскоростного сближения, A_2 , демонстрирующую временный спутниковый захват в окрестностях точек M_i и кратные минимумы (глобальный, в афелии, и дополнительные, в окрестностях точек R_i , в которых комета и Юпитер находятся на одном радиус-векторе (рис. 3)).

В верхней левой части рис. 3 дана иллюстрация парной задачи двух тел: Солнце – круговая орбита Юпитера; Солнце – эллиптическая орбита кометы A_2 . На левую часть орбиты кометы нанесены опорные точки. Это апсидальные Q и q , точка пересечения орбит X , концы мнимой фокальной хорды I и малой полуоси b . На правой части орбиты схематично показаны четыре взаимных положения кометы и Юпитера: 1 – комета находится в положении R , на одном радиус-векторе с Юпитером; 2 – комета проходит первый минимум; 3 – комета удаляется от Юпитера на максимальное расстояние f [достигается в окрестности точки низкоскоростного касания орбит M (при $e \leq 0.29$ в окрестностях этой точки фиксируется ВСЗ)]; 4 – в точке Q комета проходит

глобальный афелийный минимум. Точки R и M в дальнейшем изложении называются особыми.

В верхней правой части рис. 3 приводятся формулы для угла α и элементов, характеризующих размеры орбиты кометы A_2 , выраженные через эксцентриситет орбиты кометы e и радиус круговой орбиты Юпитера a' . Отдельной рамочкой выделена формула приведенной теоремы косинусов (16.) Она позволяет делать предварительные заключения о возможности КМ. Повышенный интерес вызывают точки R , Q ($\alpha=0$), точка X ($r_j^*=0$).

В средней левой части рис. 3 дана таблица опорных и особых точек (О.Т.) на орбите кометы и значений косинусов углов истинной (v) и эксцентрической (E) аномалий, гелиоцентрических расстояний кометы (r) и расстояний между орбитами кометы и Юпитера (r_j^*) в этих точках по радиус-вектору кометы.

В средней правой части рис. 3 изображены положения опорных точек на орбите кометы (спрямленной и вытянутой вдоль горизонтальной оси от афелия до перигелия) при различных значениях эксцентриситета.

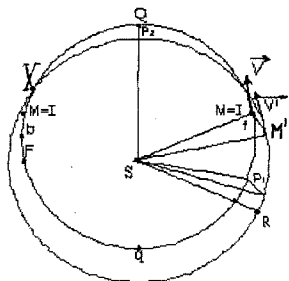
В нижней части рис. 3 построены графики функции йовицентрического расстояния на участке орбиты от афелия до перигелия для семи значений эксцентриситета.

Перечислим особенности сближения кометы A_2 .

1. Модельные сближения кометы A_2 – это афелийные сближения с параметрами орбиты: $2.3135 \leq a \leq 5.2028$ а.е.; $0 \leq e \leq 0.62$.
2. Это длительные сближения. Длина дуги орбиты, охваченной сближением, зависит от орбитального эксцентриситета. При $e \leq 0.20$ – это полное обращение вокруг Солнца; при $0.20 < e \leq 0.49$ длина постепенно сокращается до дуги $\cup F_1 Q F_2$; при $0.49 < e \leq 0.62$ – до дуги $\cup M_1 Q M_2$.
3. Функция йовицентрического расстояния кометы A_2 имеет кратные минимумы при $e \leq 0.3$. Глобальный минимум достигается в афелии, его величина зависит от орбитального эксцентриситета. Вторичные и дополнительные минимумы – это геометрические кратные минимумы (ГКМ); они имеют место в окрестностях

Область ω .

Комета A_2 ($M=I$)



$$\alpha = (E + e \cdot \sin E) \cdot \left[\frac{1-e^2}{1+e^2} \right]^{\frac{3}{2}} - \nu \quad e = \sqrt{\frac{a' - a}{a' + a}}$$

$$\alpha \leq 0$$

$$r = \frac{(1-e^2)^2}{(1+e^2)(1-e \cdot \cos \nu)} a' \quad b = \frac{(1-e^2)^{\frac{3}{2}}}{1+e^2} a'$$

$$Q = \frac{1+e-e^2-e^3}{1+e^2} a' \quad a = \frac{1-e^2}{1+e^2} a'$$

$$q = \frac{1-e-e^2+e^3}{1+e^2} a' \quad p = \frac{(1-e^2)^2}{1+e^2} a'$$

Орбита кометы A_2 с наибольшим афелийным расстоянием: $a=4.77 a.e.$; $e=0.21$

$$r_j^2 = 4ra' \sin^2 \frac{\alpha}{2} + (r_j^*)^2$$

$$\alpha_Q = 0 \quad \alpha_R = 0 \quad r_j^* = |r - a'|$$

о.т	$\cos \nu$	$\cos E$	$r, a.e.$	$r^*, a.e.$
Q	1	1	$\frac{(1-e^2)(1+e)}{1+e^2} a'$	$\frac{1-2e-e^2}{1+e^2} \cdot ea'$
X	$\frac{e(3-e^2)}{1+e^2}$	$\frac{2e}{1-e^2}$	a'	0
M=I	$\frac{2e}{1+e^2}$	e	$(1-e^2) a'$	$e^2 a'$
b	e	0	$\frac{1-e^2}{1+e^2} a'$	$\frac{2}{1+e^2} e^2 a'$
F	0	-e	$\frac{(1-e^2)^2}{1+e^2} a'$	$\frac{3-e^2}{1+e^2} e^2 a'$
q	-1	-1	$\frac{(1-e)(1-e^2)}{1+e^2} a'$	$\frac{1+2e-e^2}{1+e^2} e a'$

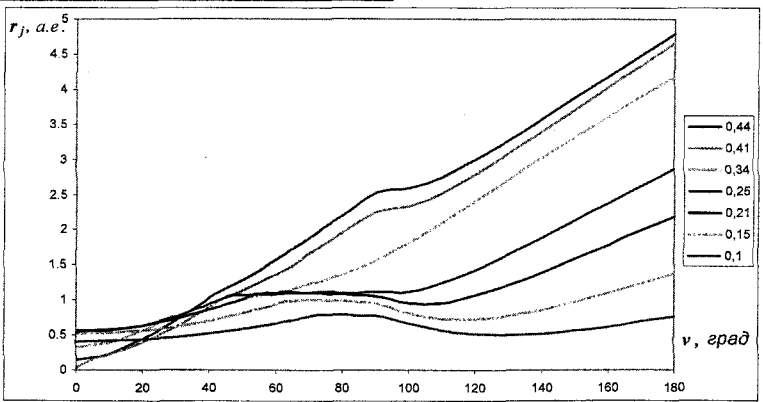
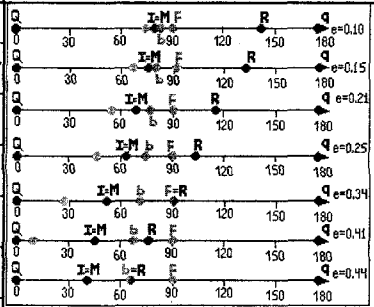


Рис. 3. Модель A_2

точек M_i , близких к точкам X_i , и в окрестностях точек, в которых оба тела находятся на одном радиус-векторе, не совпадающем с афелийным (R_1, R_2).

4. На эллиптической орбите кометы A_2 концы хорды I_1I_2 , проходящей через ее мнимый фокус, являются точками низкоскоростного касания орбит кометы и Юпитера: $I \equiv M$.

5. Точки M_i – центры низкоскоростных касательных участков. При $e \leq 0.4$ в их окрестностях возможен ВСЗ в немодельном сближении. При $e \leq 0.29$ произойдет модельное сближение с ВСЗ. При $e \leq 0.06$ ВСЗ распространится на дугу $\cup \rho_2^1 Q \rho_2^2$. При $e > 0.06$ это непродолжительный по времени процесс: $\Delta t \ll \Delta T$.

6. При $e \leq 0.035$ (в модельном сближении) и при $e \leq 0.0674$ (если в момент времени t_M Юпитер находится в точке низкоскоростного касания K) комета A_2 в окрестности точки M находится в сфере Хилла и движется с малой йовицентрической скоростью – она может испытать временный гравитационный захват. Но это, по-видимому, только теоретически возможные орбиты.

7. Помимо афелия на орбите кометы A_2 имеются еще две точки, R_1 и R_2 , в которых оба тела находятся на одном радиус-векторе.

Итак, основные особенности модельного сближения с Юпитером кометы A_2 : – это непродолжительный по времени ВСЗ в окрестностях двух точек низкоскоростного касания орбит M_1 и M_2 (при $e \leq 0.06$ ВСЗ распространится на вторичные минимумы и афелий) и геометрические кратные минимумы функции йовицентрического расстояния при $e \leq 0.3$. Для практически круговых орбит, совпадающих с орбитой Юпитера, теоретически возможен ВГЗ в окрестностях точек M_1 и M_2 .

В Главе 5 в свете предложенных моделей изучены особенности низкоскоростных сближений наблюдаемых комет. Отдельно исследована эволюция орбит ядер кометы Шумейкер–Леви 9 (в прошлом).

В § 5.1 рассмотрена реверсия линии апсид. Каждая реверсия – это некоторый процесс, происходящий в пространстве и во времени. Пусть наблюдаемая комета имеет A -орбиту на промежутке времени, в течение которого

выполнено неравенство $a < R_J$ и P -орбиту на промежутке времени, в течение которого выполнено неравенство $a > R_J$, где R_J – радиус-вектор Юпитера на каждом шаге интегрирования. Считаем, что произошла реверсия линии апсид, если в области сближения существует такой момент времени $T_{@}$, в который выполнено равенство:

$$|Q - R_J| = |q - R_J| \Rightarrow a = R_J. \quad (17)$$

В наших исследованиях было обнаружено 85 сближений с реверсией линии апсид: 78 реверсий имеют 36 комет первой группы и 7 реверсий – 6 комет второй группы. У комет с высоким значением постоянной Тиссерана реверсия наблюдается в сильных, тесных и умеренных сближениях; у комет второй группы – только в сильных сближениях:

$$0.001 \leq \rho_1 \leq 0.630 \text{ а.е.}, \quad (18)$$

$$0.0015 \leq \rho_2 \leq 0.083 \text{ а.е.} \quad (19)$$

Из приведенных данных следует важный вывод о том, что, с одной стороны, далеко не в каждом тесном и даже сильном сближении наблюдается реверсия линии апсид, с другой стороны, явление имеет место в умеренных сближениях комет первой группы.

Реверсии как $A \leftrightarrow P$ -переходы не наблюдаются в модельных сближениях, разработанных в нашей работе. В этих сближениях преобразования размеров и формы орбит близки к симметричным относительно глобального минимума, совпадающего с апсидальной точкой. Этот вывод согласуется с закономерностью, открытой Леверье еще в середине XIX века: если во время тесного сближения Юпитер идет впереди кометы, он расширяет ее орбиту; если он идет позади кометы, его возмущающее действие сокращает орбиту.

В модельных сближениях Юпитер идет позади (впереди) кометы до апсидальной точки на орбите кометы и впереди (позади) кометы – после этой точки. Чем ближе точки минимума и афелия (перигелия), тем меньше возмущающее влияние Юпитера на элементы орбиты, характеризующие ее размеры и форму, за сближение. Поэтому реверсии линии апсид отсутствуют в

сильных модельных сближениях многих комет как первой, так и второй групп, например, таких как № 5 Брукс 1, № 27 Когоутек, № 29 Герельс 3, № 32 Ловел, № 87 Рассел 1, № 91 Чурюмов–Герасименко и других комет.

Реверсии линии апсид у наблюдаемых комет имеют место в немодельных сближениях.

Для сокращения описания преобразований орбит наблюдаемых комет в сближениях с реверсиями мы будем обозначать орбиты теми же буквами и индексами, которые были использованы при описании модельных сближений, несмотря на то, что в момент времени $T_Q \cup T_q$ комета и Юпитер уже не находятся на одном радиус-векторе. Реверсии как $A \leftrightarrow P$ -переходы происходят тогда, когда комета и Юпитер приблизительно или точно расположены на одном радиус-векторе в окрестностях точек X_i . (для наблюдаемых комет – это точки, в которых равны длины радиус-векторов кометы и Юпитера). Но точки X_i близки к точкам низкоскоростного касания M_i для l - и m -орбит ($e < 0.5$) комет первой группы. Кометы второй группы большую часть времени из промежутка (t_1-t_2) провели на m - ($e \geq 0.5$) и h -орбитах, на которых точки M_i расположены далеко от точек X_i или отсутствуют в области сближения. Высокая йовицентрическая скорость в окрестностях точек X_i приводит к тому, что в сближениях комет второй группы реверсии происходят на меньших йовицентрических расстояниях по сравнению с кометами первой группы.

Точки X_i всегда присутствуют на орбитах комет, расположенных выше линии A_3JP_3 плоскости (a, e) . У комет первой группы реверсии в окрестностях точек X_i по схеме $A_3 \leftrightarrow P_3$ имеются в эволюциях орбит комет Де Вико–Свифт–НЕАТ, Брукс 2, Смирновой–Черных, Каталина, Скоти. Реверсии в окрестностях точек X_i по схеме $A_2 \leftrightarrow P_2$ имеются в эволюциях орбит комет Швассман–Вахман 2, Ашбрук–Джексон, Герельс 2, Ковал 1, Шумейкер–Леви 8, Ларсен, ЛИНЕАР, Корлевик, Юнг, Вест–Хартли. На орбитах комет, расположенных между линиями A_1JP_1 , A_3JP_3 , нет точек X_i . Но у наблюдаемых комет, орбиты которых близки к линии A_1JP_1 в момент входа малого тела в область сближения и выхода из нее,

известны сближения с $A \leftrightarrow P$ -переходами. Они испытывают реверсию, в которой положение точки низкоскоростного касания орбит в области сближения изменяется по схеме $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_1$ ($P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow A_3 \rightarrow A_1$). Подобные реверсии линии апсид зафиксированы в низкоскоростных сближениях комет Герельс 3, Вильд 3, Паркер–Хартли, Скоти, Скиф–Козаи и других наблюдаемых комет.

Замечание 1. Как правило, в рассмотренных схемах реверсии на моменты времени T_1 и T_2 сохраняется нижний индекс, указывающий номер модели. Это говорит об устойчивости взаимосвязи элементов, характеризующих размеры и форму орбит, в предложенных моделях.

Замечание 2. Осуществлению реверсии в окрестности точки X , близкой к точке M в низкоскоростном сближении, способствует установленный в Главе 3 факт того, что на орбите Юпитера имеется одна и та же точка низкоскоростного касания K для A и P моделей с одинаковыми элементами орбит кометы e, E .

Замечание 3. В нескольких немодельных низкоскоростных сближениях с ГКМ реверсия происходит на больших йовицентрических расстояниях r_j в окрестности точки f – максимума функции r_j , совпадающей с точкой M .

Замечание 4. В сближениях с ВГЗ в сфере Хилла, сопровождающихся физическими кратными минимумами (ФКМ), имеют место множественные реверсии. Обычно, первая реверсия происходит в окрестностях глобального минимума по схеме $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_1$. Здесь же начинается ВГЗ. Последующие реверсии осуществляются в окрестностях точек f_i или $Q_i(q_i)$, близких к точкам низкоскоростного касания орбит M_i . Число реверсий как правило не совпадает с числом минимумов функции йовицентрического расстояния.

Замечание 5. Все реверсии в высокоскоростных немодельных сближениях комет второй группы происходят в окрестности точки X , практически совпадающей с точкой минимума функции йовицентрического расстояния. Если ломаные линии $A_i P_i$ продолжить за пределы области ω , то реверсии в высокоскоростных сближениях будут соответствовать схемам $A_3 \leftrightarrow P_3$ или $A_2 (A_4) \leftrightarrow P_2 (P_4)$.

В § 5.2 изучается временный спутниковый захват комет Юпитером.

Среди задач, рассматриваемых теоретической астрономией, выделяется задача гравитационного захвата.

При исследовании фиктивных малых тел, орбиты которых имеют незначительный наклон к плоскости эклиптики, а размеры орбит близки к размерам орбит Юпитера или Сатурна, Эверхартом были выявлены случаи перехода малого тела на окулирующую эллиптическую планетоцентрическую орбиту. Это явление Эверхарт назвал временным спутниковым захватом (ВСЗ) малого тела Юпитером или Сатурном [5]. Это же явление подтверждено в серии исследований Карузи и др. [6, 7], проведенных для фиктивных и реальных объектов. Все исследователи отмечают, что явление ВСЗ в смысле Эверхарта возникает при достаточно высоком значении постоянной Тиссерана: $T_C \approx 2.8-3.0$.

В последние десятилетия внимание исследователей привлекла задача о переходе короткопериодической кометы в семейство спутников Юпитера. Такой переход теоретически возможен в рамках ограниченной задачи трех тел. Существование интеграла Якоби в круговой задаче позволяет отделить области пространства, где движение возможно, от той части пространства, где движение невозможно. Форма и размеры этих областей (областей Хилла) существенно зависят от величин масс притягивающих тел и от энергии тела малой массы, то есть, от её начального положения и начальной скорости [8].

Для тела малой массы в окрестности Юпитера существует обособленная сфера Хилла, если выполнено условие:

$$T_C > 3.04260. \quad (20)$$

В рамках рассматриваемой задачи переход кометы в эту сферу возможен через точку либрации L_1 , если выполнено условие:

$$3.04132 < T_C \leq 3.04260. \quad (21)$$

Такой переход возможен через точку либрации L_2 , если выполнено условие:

$$T_C \leq 3.04132, \quad (22)$$

но в этом случае с уменьшением величины T_C горла в окрестности точек L_1, L_2 быстро расширяются, и поверхность Хилла уже не образует вокруг Юпитера обособленной области. Осуществив вход в сферу Хилла через точку либрации L_2 , комета может покинуть эту область через точку либрации L_1 , не совершив полного обращения вокруг Юпитера.

Результаты численного интегрирования уравнений движения наблюдаемых комет в сфере Хилла интерпретируем в рамках ограниченной задачи трёх тел. Например, Рой [9] показал, что прогноз движения, полученный при помощи интеграла Якоби, справедлив на интервале времени порядка нескольких периодов обращения планеты вокруг Солнца.

Как известно, движение спутника считается устойчивым по Хиллу, если его постоянная Тиссерана такова, что граничная поверхность Хилла замкнута вокруг Юпитера, а спутник находится внутри неё [10].

Итак, для того, чтобы движение наблюдаемой кометы было устойчивым по Хиллу, необходимо: а) чтобы в окрестности точки либрации L_1 выполнялось условие (20), или в окрестности точки либрации L_2 выполнялось условие (21); б) после входа в сферу Хилла постоянная Тиссерана должна незначительно возрасти, чтобы поверхность Хилла замкнулась [стало выполняться условие (22)].

В настоящее время все гипотезы перехода малого тела в семейство спутников Юпитера в качестве первой фазы требуют временный гравитационный захват (ВГЗ) планетой – наличие эллиптических планетоцентрических элементов внутри сферы Хилла.

В наших исследованиях обнаружено 58 комет первой группы с ВСЗ в смысле Эверхарта на промежутке времени (t_1-t_2) хотя бы в одном сближении с Юпитером. Общее число сближений с ВСЗ для 58 комет – около трехсот. Тщательное исследование эволюции орбит этих комет показало, что их орбиты принадлежат области ω на 800-летнем промежутке времени. Все орбиты из области ω могут испытывать низкоскоростные сближения с ВСЗ в окрестностях точек низкоскоростного касания M_i .

Детальный анализ всех сближений наблюдаемых комет с ВСЗ показал, что явление происходит на низкоскоростных касательных участках в окрестностях точек минимальной йовицентрической скорости M_i .

Основная причина ВСЗ в смысле Эверхарта у наблюдаемых комет – наличие на их орбитах низкоскоростных касательных участков.

Введем следующие определения.

Промежуток времени, в течение которого комета перемещается по эллиптической йовицентрической орбите, обозначим $\Delta\tau$ и назовем длительностью ВСЗ.

Часть гелиоцентрической (йовицентрической) траектории, которую комета проходит за промежуток времени $\Delta\tau$, назовем гелиоцентрическим (йовицентрическим) участком ВСЗ. Момент входа кометы на участок ВСЗ обозначим τ_b и назовем началом ВСЗ, момент выхода кометы из участка ВСЗ обозначим τ_e и назовем концом ВСЗ ($\tau_b < \tau_e$).

подавляющее большинство сближений наблюдаемых комет с ВСЗ в смысле Эверхарта – это сближения комет с орбитами, подобными орбитам модельных комет $A_2, A_4; P_2, P_4$. ВСЗ появляется в окрестностях точек низкоскоростного касания орбит: комета находится на границе области сближения; на участке траектории $\tau_b\tau_e$ всегда имеется точка f – максимум функции йовицентрического расстояния r_j . В некоторых границах орбитального эксцентриситета, индивидуальных для каждой модели, участку $\tau_b\tau_e$ принадлежит далекий геометрический минимум функции r_j (при других значениях величины e этот минимум расположен вне участка $\tau_b\tau_e$). Анализ моделей исключает ВГЗ у комет с орбитами, подобными орбитам моделей $A_2, P_2; A_4, P_4: r_j^M \gg r_x^J$.

Имеются наблюдаемые кометы с орбитами, близкими к моделям A_1, P_1 (они сопровождаются длительным ВСЗ в окрестности единственного апсидального минимума), а также кометы, чьи орбиты подобны орбитам комет A_3, P_3 , но их сближения не являются модельными: в момент времени $T_Q \cup T_q$ комета и Юпитер уже не находятся на одном радиус-векторе. У комет с орбитами A_3, P_3 ВСЗ всегда

появляется в окрестностях точек M_i , а единственный минимум не совпадает с апсидальным.

В наших исследованиях наблюдаемых комет ВГЗ по Хиллу обнаружен в модельных и немодельных сближениях комет с орбитами $A_1, A_3; P_1, P_3$.

Для качественного анализа движения комет в окрестности Юпитера используем понятие сферы Хилла и постоянной Тиссерана, которую на каждом шаге интегрирования вычислим по формуле:

$$T_C = \frac{R_j}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{R_j}(1-e^2)} \cos i, \quad (23)$$

где a, e, i – элементы гелиоцентрической орбиты кометы, R_j – гелиоцентрическое расстояние Юпитера в момент времени t_i . Так как мы рассматриваем возмущенное движение кометы в окрестности Юпитера, находящегося на эллиптической орбите, величина T_C будет изменяться. В дальнейшем изложении эту величину мы называем параметром Тиссерана (относительно Юпитера).

Рассмотрим наблюдаемые кометы, испытавшие ВГЗ как ВСЗ в сфере Хилла. Таких комет оказалось всего девять. Параметры Тиссерана комет в моменты времени T_1, T_2 (начало и конец сближения) близки к значению $T_C = 3$. По мере продвижения к глобальному минимуму у всех комет значения величины T_C уменьшаются. Необходимые условия устойчивости по Хиллу не выполнены.

Движение наблюдаемых комет при временном гравитационном захвате Юпитером неустойчиво по Хиллу.

Перечислим основные особенности изученных сближений с ВГЗ по Хиллу.

Гелиоцентрические орбиты комет имеют небольшой наклон в моменты времени $T_b, T_2, \tau_b, \tau_e, t_i^x$ (t_i^x – моменты времени, в которые комета пересекает сферу Хилла). Некоторое его увеличение в окрестностях глобального минимума не оказывает существенного влияния на уменьшение параметра Тиссерана на дуге орбиты $\cup t_i^x p$ – в большей мере оно происходит из-за увеличения эксцентриситета в минимуме. Орбиты всех комет в моменты времени $T_1, T_2; \tau_b, \tau_e; t_i^x$ расположены между линиями $A_1 - A_3, P_1 - P_3$ области ω .

Сближения с ВГЗ – это длительные сближения. В сближениях с одним минимумом функции йовицентрического расстояния $\Delta T \approx P_J$ (P_J – период обращения Юпитера вокруг Солнца). В сближениях с КМ $\Delta T \approx nP_J$ ($1.5 \leq n \leq 4.4$).

Пересечения наблюдаемой кометой сферы Хилла не отмечены особыми или опорными точками. Но внутри нее движение изученных комет явно отличается от движения модельных комет $A_1, A_3; P_1, P_3$. Основное отличие – появление в 11 сближениях кратных минимумов. Напомним, что орбиты, расположенные между линиями $e_1 - e_3$, не могут иметь геометрических КМ. КМ появляются в результате выхода кометы на оскулирующую эллиптическую йовицентрическую орбиту, целиком расположенную в сфере Хилла. В сближениях с КМ минимумы неоднородны по величине ρ_i , как правило, йовицентрическое расстояние в минимумах изменяется в широких пределах. Имеются как модельные: $T_\rho \approx T_Q$ U $T_\rho \approx T_q$, так и немодельные: $T_\rho \neq T_Q$ U $T_\rho \neq T_q$, минимумы.

Промежутки времени $\Delta t_i = t_{\rho_i} - t_{\rho_{(i-1)}}$ существенно не совпадают с величиной P_j^{sp} – средним периодом оскулирующей йовицентрической орбиты кометы. В окрестностях сильных минимумов орбита кометы иногда оказывается между линиями $e_3 - e_2$ (e_4) области ω , где возможны геометрические КМ (комета №23 Смирнова–Черных) Из чего следует, что часть КМ могут являться ГКМ.

Только в окрестностях двух сильных минимумов кометы № 29 Герельс 3 на небольшом промежутке времени появляются оскулирующие гиперболические гелиоцентрические элементы орбиты.

Абсолютное большинство сближений сопровождается реверсиями линии апсид. В сближении осуществляется эволюционный переход по схемам $A \leftrightarrow P$, если число реверсий нечетное. Число реверсий очень редко совпадает с числом минимумов. Реверсии происходят в окрестностях минимумов ρ_i , максимумов f_j , апсидальных точек (Q или q), но всегда вблизи точек низкоскоростного касания орбит M_i . Реверсии не осуществляются вблизи модельных минимумов (если точки ρ_i и $Q(q)$ почти совпадают). На участках ВГЗ элементы оскулирующих гелиоцентрической и йовицентрической орбит кометы претерпевают большие

изменения. Но положения всех комет на плоскости (a, e) – между линиями e_1 – e_3 . Эволюционное состояние как функция эксцентриситета практически не изменяется при четном числе реверсий (кроме сильных минимумов, где это условие выполняется не всегда: возможны изменения формы орбиты по схемам $m \leftrightarrow l$). Если число реверсий нечетное, происходит эволюционный переход по схемам: $A_1 \leftrightarrow P_1, A_1 \leftrightarrow P_m, A_m \leftrightarrow P_1$.

ВГЗ по Хиллу заканчивается в окрестностях точек либрации L_1, L_2 . В момент времени T_L комета выходит на йовицентрическую орбиту с апожием, значительно превышающим радиус сферы Хилла.

В области сближения и на участках ВСЗ и ВГЗ наклон йовицентрической орбиты i_j сильно изменяется.

Имеется несомненная связь между йовицентрической траекторией кометы и величиной i_j ; это петли при прямом движении, часто по форме приближающиеся к спутниковым орбитам; это подковообразные траектории при обратном движении. В сближениях с обратным движением нет КМ, если обратное движение, особенно его пик, не принадлежит участку ВГЗ.

Если обратное движение сохраняется внутри сферы Хилла и минимума ρ_i , то обязательно будет иметь место минимум ρ_{i+1} .

Итак, в рамках предложенной области комет с особенностями в сближениях с Юпитером ω и восьми моделей на ней на плоскости (a, e) выделена область орбит $A_1 - A_3; P_1 - P_3$, позволяющая наблюдаемой комете испытать ВГЗ по Хиллу и стать временным спутником Юпитера. На рисунках 4а,б показаны положения наблюдаемых комет с ВГЗ в области ω в моменты времени T_1, T_2 .

В § 5.3 проанализированы движения ядер кометы Шумейкер-Леви 9 в ее последнем сближении с Юпитером.

Исследуем йовицентрическое движение каждого ядра в отдельности как возможный вариант движения кометы в области сближения.

Определим элементы гелиоцентрических орбит ядер в момент времени T_i – момент входа каждого ядра в область сближения (в прошлом).

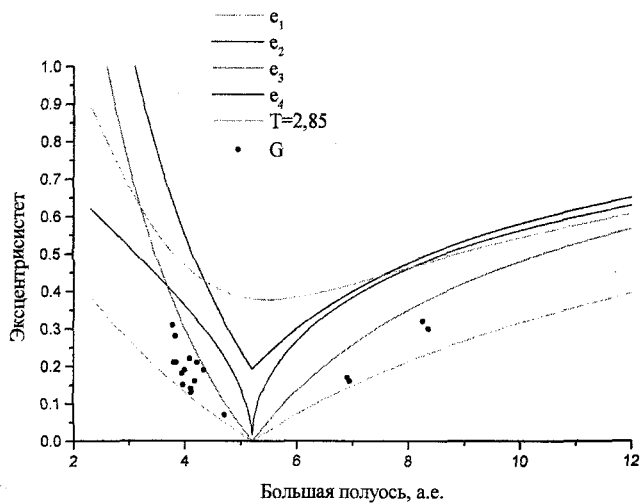


Рис. 4а. Положения наблюдаемых комет с ВГЗ в области ω в момент времени T_1

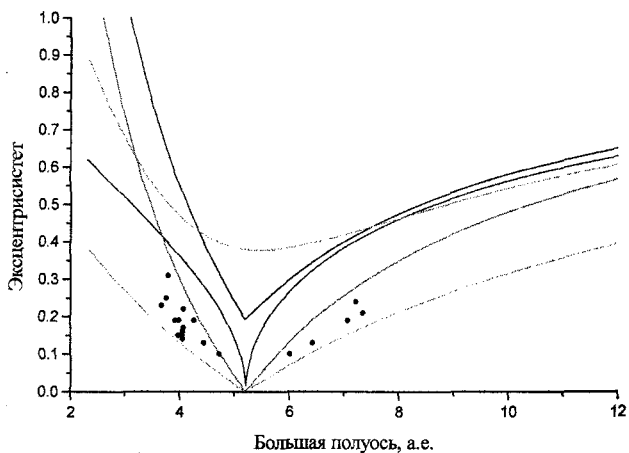


Рис. 4б. Положения наблюдаемых комет с ВГЗ в области ω в момент времени T_2

Можно было предположить, что состояния ядер в момент времени T_1 будут разделяться на три группы:

Состояние A – афелийное расстояние гелиоцентрической орбиты близко к большой полуоси орбиты Юпитера :

$$Q \approx a'. \quad (24)$$

Состояние P – перигелийное расстояние гелиоцентрической орбиты близко к большой полуоси орбиты Юпитера:

$$q \approx a'. \quad (25)$$

Состояние S – йовицентрическое расстояния ядра в некоторый момент времени T_1^* не больше среднего радиуса Юпитера ($R=0.00043$ а.е.):

$$r_j \leq R. \quad (26)$$

В ходе проделанной работы в момент входа каждого ядра в область сближения было выявлено только одно состояние A – у всех ядер афелий был расположен в окрестности орбиты Юпитера.

Дальнейшее исследование результатов интегрирования показало, что ядра различаются по двум признакам.

Во-первых, по моменту входа в область сближения выделяется группа ядер D, S, U – у них общее время сближения ΔT существенно больше, чем у остальных ядер; разброс величины ΔT внутри группы тоже большой: $\Delta t \leq 23709$ суток $\approx 57\%$ от их среднего времени сближения. Ядро E занимает промежуточное положение. Остальные ядра входят в область сближения относительно компактно: $\Delta t \leq 840$ суток $\approx 19\%$ от среднего времени сближения группы.

Во-вторых, по положению орбит ядер на плоскости (a, e) и области ω . Шесть ядер: B, C, H, N, R, V расположены компактной группой на линии A_4J и выше нее (не принадлежат области ω). Орбиты этих ядер имеют большие наклон, эксцентриситет, афелийное расстояние и, как следствие, низкое значение параметра Тиссерана. Все остальные ядра расположены компактной группой в окрестности линии A_3J (принадлежат области ω). Итак, 13 ядер вошли в область сближения в эволюционном состоянии A_3 (афелий располагался в окрестности

орбиты Юпитера) – это 68% от всех ядер, то есть большинство исследованных ядер: $A, D, E, F, G, K, L, P, Q, S, T, U, W$.

Анализ результатов интегрирования группы из шести ядер показал, что у них было соприкосновение с Юпитером. В некоторый момент времени их йовицентрическое расстояние удовлетворяло условию (26). Момент соприкосновения обозначим $(T_1^*)_i$. Орбиту ядра состояния S в момент времени $(T_1^*)_i$ назовём финальным состоянием ядра. Считаем, что все остальные ядра имеют финальное состояние A . Пусть T_1^* – среднее значение $(T_1^*)_i$. Мы выделили минимумы 13 ядер, не испытавших соприкосновения с Юпитером, в моменты времени $(t_2)_i$, максимально близкие к величине T_1^* . Величины $(t_2)_i$ близки для всех 13 ядер и имеют разброс в 114 суток, исключая ядро S (напомним, что это ядро входит в тройку ядер с существенно большим временем сближения).

Из сравнения величин $(r_{ji})_i$ в моменты времени $(T_1^*)_i$ следует, что речь не идет о столкновении с Юпитером, так как йовицентрические расстояния ядер с финальным состоянием S различаются не более чем на 0.00012 а.е. от среднего радиуса Юпитера. Они вызваны, скорее всего, ошибками наблюдений, интегрирования, неучтенными реактивными силами в момент распада, накопившимися в уникальном сближении с многочисленными сильными минимумами. Йовицентрические расстояния в минимуме в моменты времени $(t_2)_i$ ядер с финальным состоянием A различаются между собой не более чем на 0.00006 а.е. и не менее чем на 0.00013 а.е. от среднего радиуса Юпитера. То есть, в среднем это в два раза более компактная группа, расположенная на таком же расстоянии от величины $R = 0.00043$ а.е., но не достигающая ее. Можно предположить, что комета Шумейкер–Леви 9, также как и комета Галлея, имела форму гантели и сначала разделилась на две части в перемычке под действием приливных сил (возможно, каких-то других сил, которые очень трудно учесть, так как не до конца известна их природа). При интегрировании уравнений движений ядер они не учитывались. Поэтому у нас получились два разных финальных состояния: A и S . Из одного куска получились ядра с финальным

состоянием A , а из другого – с финальным состоянием S . Отметим, что элементы гелиоцентрических и йовицентрических орбит ядер с финальными состояниями A и S имеют небольшую дисперсию внутри своих групп.

Мы подсчитали число минимумов каждого ядра в области сближения. Для орбит вида A и S – до момента времени T_1 . Для орбит ядер D, S, U – дополнительно на промежутке времени $T_1-(t_2)$. У всех ядер, кроме D, S, U , минимум в момент времени (t_2) , был первым минимумом сближения, что является дополнительным аргументом в пользу вывода о том, что комета распалась, по крайней мере, на две части, в первом минимуме. Большинство исследователей считают моментом распада дату $t_3= 2448811.5$ JD. Отметим, что совпадение элементов йовицентрических орбит на дату t_3 очень хорошее. Это связано с малым промежутком интегрирования (T_2-t_3) и прекратившимся после момента времени t_3 распадом кометы.

В нашей работе была предпринята попытка по определению моментов распада кометы на 19 ядер (по крайней мере, о других ядрах нам ничего не известно).

При исследовании ядер кометы Шумейкер–Леви 9 были найдены все минимальные йовицентрические расстояния ядер и их число:

$$35 \leq N \leq 165.$$

Были определены отклонения моментов наступления минимумов ядер от каждого среднего момента наступления минимума для всех ядер):

$$\Delta t = T_{cp} - T_{min}^i,$$

где $i = 1, 2, \dots, 19$.

Мы предположили, что отклонения будут минимальны в момент отделения очередного ядра от родительского тела. Они минимальны на промежутке времени между 36 и 92 минимумами:

$$36 \leq N \leq 92.$$

Это говорит о том, что, скорее всего, где-то на этом промежутке времени комета Шумейкер–Леви 9 распалась на известные фрагменты. Маленькие

отклонения наблюдаются в течение 56 обращений кометы вокруг Юпитера, что подтверждает наше предположение о постепенном дроблении родительского тела.

На рис. 5 изображена область ω и финальные положения A 13 ядер. Все эти ядра попадают в левую часть области ω (афелий расположен в окрестности орбиты Юпитера). Такие объекты могут испытывать низкоскоростные сближения. Ядра оказались в области между линиями A_1 и A_3 , на линии A_3 или чуть выше этой линии. Все ядра близки к линии A_3 (афелий совпадает с радиусом гелиоцентрической орбиты Юпитера), что делает возможным тесное ($0.084 < \rho \leq 0.347$ а.е.) или даже сильное модельное сближение с ним ($\rho \leq 0.084$ а.е.).

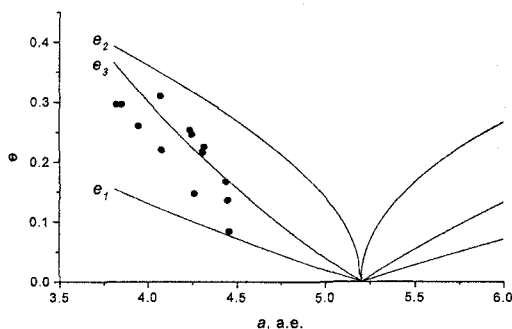


Рис. 5. Финальные состояния 13 ядер на плоскости (a, e)

Но у 13 ядер кометы Шумейкер–Леви 9 в момент времени T_1 начинается немодельное сближение. На границе сферы Хилла Юпитер и ядра находятся почти на одном радиус-векторе, но планета движется на несколько угловых градусов впереди ядер, незначительно расширяя их гелиоцентрическую орбиту. В наших вычислениях афелии этой группы ядер оказываются за пределами орбиты Юпитера (все орбиты попадают в область между линиями A_3, A_2 — на орбитах ядер появляются точки пересечения их орбит с орбитой Юпитера — X_i). У 13 ядер в моменты времени $(t_2)_i$ происходят низкоскоростные немодельные сближения с сильными минимумами в окрестностях точек X_i , которые близки к точкам низкоскоростного касания орбит M_i : $2^\circ \leq \nu_M - \nu_X \leq 23^\circ$. Сильные низкоскоростные

сближения привели к гравитационному захвату ядер на орбиты спутников Юпитера. У 10 ядер – это первый минимум сближения. Все последующие минимумы 13 ядер – это физические кратные минимумы (ФКМ). Пусть 13 ядер кометы составляли родительское тело 1.

Когда ядра с финальным состоянием S формально покидают область сближения в прошлом (момент времени T_1), они находятся на орбите A_4 и выше, за пределами области ω . Точки M_i на их орбитах не могут принадлежать области сближения с Юпитером. В моменты времени $(T_1^*)_i$ у них происходят высокоскоростные немодельные сближения с сильными минимумами в окрестностях точек пересечения орбит (минимумы этих ядер приблизительно совпадали со средним радиусом Юпитера). Они также привели к гравитационному захвату ядер на орбиты спутников Юпитера. Все последующие минимумы 6 ядер – это физические кратные минимумы (ФКМ). Пусть 6 ядер кометы составляли родительское тело 2.

Тела 1 и 2 до сближения с Юпитером находились на существенно разных гелиоцентрической орбитах. Но впоследствии родительские тела 1 и 2 дали один кометный пояс, наблюдавшийся в течение 1.5 лет, что, практически, невероятно.

Актуально и наиболее вероятно предположение о том, что первоначально комета распалась на две части. Из одной части получились ядра с финальным состоянием A , из другой – с финальным состоянием S . Разделение кометы Шумейкер–Леви 9 на две части, скорее всего, произошло на промежутке времени $(T_1^* - t_2)$, где T_1^* , t_2 – средние значения $(T_1^*)_i$, $(t_2)_i$.

В дальнейшем дробление родительских тел 1 и 2 продолжалось на промежутке времени между 36 и 92 минимумами (при интегрировании назад от момента времени T_2).

Итак, комета Шумейкер–Леви 9 имела орбиту A относительно орбиты Юпитера. Ее последнее афелийное сближение с планетой – это немодельное сближение с сильным минимумом в окрестности точки пересечения орбит, в котором комета распалась на две части. В дальнейшем дробление этих

частей продолжалось на протяжении 56 обращений кометы вокруг Юпитера и привело к образованию 19 известных ядер.

Мы построили графики йовицентрических траекторий ядер кометы Шумейкер-Леви 9. 10 траекторий ядер с финальным состоянием A и все траектории ядер с финальным состоянием S имеют вид, подобный траектории ядра G , изображенной на рис. 6а. Три ядра с финальным состоянием A , чьи формальные моменты входа в область сближения произошли значительно раньше, имеют до момента времени $t \in (T_1^* - t_2)$, существенно другую траекторию (рис. 6б). Но и в ней выделяется финальная часть, подобная рис. 6а.

Моменты времени $(T_1^*)_i$ для шести ядер с финальным состоянием S различаются между собой не более чем на 225 суток, и они не совпадают с резким изменением положения их йовицентрических орбит в пространстве. Это изменение близко по времени для всех 19 ядер.

Анализ изменения оскулирующих йовицентрических орбит ядер показал следующее.

ВГЗ кометы Шумейкер-Леви 9 выводит все ядра кометы на сильно вытянутую йовицентрическую орбиту: $e \approx 0.99$. Глубоко внутри сферы Хилла происходит уменьшение эксцентриситета йовицентрической орбиты ядер до значения $e_j \approx 0.45 - 0.6$, а затем начинается его увеличение вплоть до $e_j \approx 0.99$. Одновременно имеет место быстрое вращение линии апсид. Аргумент перигелия изменяется в среднем от 70° до 130° – что и отражается на рисунках траекторий. Процесс происходит при наклонах йовоцентрических орбит, близких к 90° .

Перечисленные трансформации йовицентрических орбит на промежутке времени от минимума $\rho \in (T_1^* - t_2)$ до падения ядер на Юпитер свидетельствуют о возмущающем влиянии Солнца. Графики функции йовицентрического расстояния ядер на промежутке времени $T_1 - (T_1^* - t_2) - T_2$ подтверждают это предположение. Для всех ядер с близким моментом входа в область сближения промежутков времени $(T_1 - T_2)$, где $T_1 \approx (T_1^* - t_2)$, не слишком велик. Для этих ядер в области сближения преобладают возмущения от Солнца. Йовицентрические расстояния

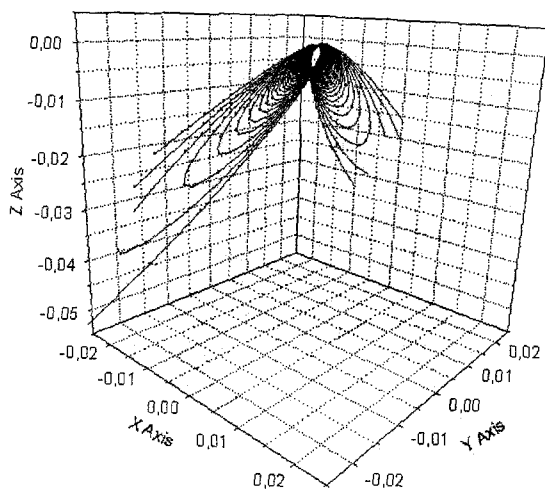


Рис. 6а. Йовицентрическая траектория ядра G

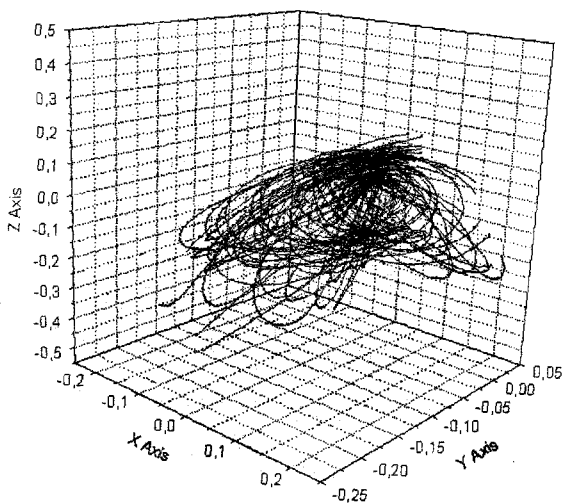


Рис. 6б. Йовицентрическая траектория ядра D

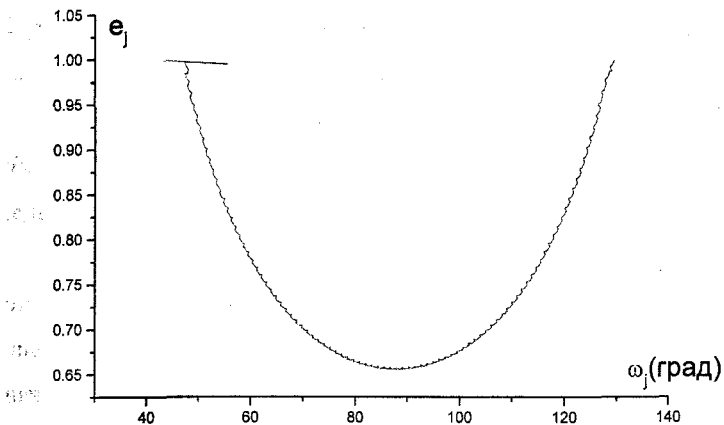


Рис. 7а. Изменение аргумента перигелия и эксцентриситета йовицентрической орбиты ядра *G*

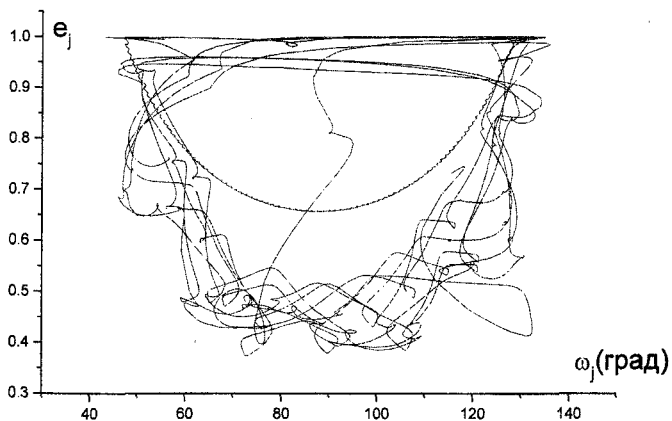


Рис. 7б. Изменение аргумента перигелия и эксцентриситета йовицентрической орбиты ядра *D*

таких ядер изменяются подобно йовицентрическому расстоянию ядра G . Для ядер D, S, U сближение начинается задолго до промежутка времени $(t_1^* - t_2)$. Для них йовицентрические расстояния изменяются подобно йовицентрическому расстоянию ядра D : сначала большее влияние на йовицентрические орбиты оказывают дифференциальные планетные возмущения (промежуток времени $[T_1 - (t_1^* - t_2)] \gg [(t_1^* - t_2) - T_2]$, затем – возмущения от Солнца, как и для остальных ядер.

В качестве подтверждения приведем графики изменения эксцентриситета как функции аргумента перигелия для ядер G и D (рис. 7а,б). Для ядра D график демонстрирует некоторое подобие диаграммы Лидова–Козаи с центром вблизи значения аргумента перигелия $\omega_j = 90^\circ$.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

Список публикаций по теме диссертации

(подчеркнуты номера работ, опубликованных в журналах из списка ВАК)

1. Емельяненко, Н.Ю. Тесные сближения комет с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // Кометный циркуляр. – 1984. – № 331. – С. 3–4.
2. Емельяненко, Н.Ю. Сближение кометы Герельс 3 с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // Кометный циркуляр. – 1985. – № 341. – С. 3.
3. Емельяненко, Н.Ю. Движение кометы Брукс 2 в сфере действия Юпитера в 1886 году / Н.Ю. Емельяненко // Астрон. Вестн. – 1986. – Т. 20. – № 4. – С. 334–342.
4. Емельяненко, Н.Ю. Тесные сближения короткопериодических комет с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // Рига: Сборник научных трудов ЛГУ. Анализ движения тел Солнечной системы и их наблюдения. – 1986. – С. 97–102.
5. Емельяненко, Н.Ю. Движение кометы Брукс 2 в зоне спутников Юпитера в 1886 году / Н.Ю. Емельяненко // Кинематика и физика небесных тел. – 1986. – Т. 2. – № 4. – С. 87–90.

6. Емельяненко, Н.Ю. О точности исходной системы элементов / Н.Ю. Емельяненко // *Кометный циркуляр*. – 1986. – № 409. – С. 4–6.
7. Емельяненко, Н.Ю. Анализ влияния несферичности фигуры Юпитера / Н.Ю. Емельяненко // *Кометный циркуляр*. – 1990. – № 410. – С. 6–7.
8. Емельяненко, Н.Ю. Анализ влияния негравитационных эффектов / Н.Ю. Емельяненко // *Кометный циркуляр*. – 1990. – № 411. – С. 11–12.
9. Емельяненко, Н.Ю. Анализ влияния галилеевых спутников / Н.Ю. Емельяненко // *Кометный циркуляр*. – 1990. – № 420. – С. 7–8.
10. Емельяненко, Н.Ю. Влияние несферичности фигуры Юпитера на эволюции элементов орбит короткопериодических комет / Н.Ю. Емельяненко // *Циркуляр ВАГО*. – 1990. – № 49. – 3 С.
11. Емельяненко, Н.Ю. Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. 1. Анализ влияния ошибок исходной системы элементов / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 5. – С. 24–29.
12. Емельяненко, Н.Ю. Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. 2. Анализ влияния несферичности фигуры Юпитера / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 5. – С. 30–34.
13. Емельяненко, Н.Ю. Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. 3. Анализ влияния галилеевых спутников / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 6. – С. 84–89.
14. Емельяненко, Н.Ю. Влияние негравитационных сил на эволюцию орбит комет, тесно сближающихся с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1993. – Т. 9. – № 5. – С. 22–26.
15. Емельяненко, Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 1. Орбитальная эволюция / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 1997. – Т. 31. – № 3. – С. 257–267.
16. Емельяненко, Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 2. Сближения с Юпитером и другими планетами-

гигантами / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 1997. – Т. 31. – № 6. – С. 516–522.

17. Emelyanenko, N.Yu. Kinematics of the comets low-velocity encounters with Jupiter / N.Yu. Emelyanenko // *Proceeding of the International conference “САММАС–99”* (prof. K.I. Churyumov). Winnisya, 1999. – 2000. – P. 35–40.

18. Емельяненко, Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 3. Кинематика низкоскоростных сближений / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 2003. – Т. 37. – № 1. – С. 66–73.

19. Емельяненко, Н.Ю. Моделирование орбит комет / Н.Ю. Емельяненко // *Вестник ЮУрГУ.* – 2003. – Вып. 6. – № 8(24). – С. 99–106.

20. Емельяненко, Н.Ю. Динамика орбит комет при тесном сближении с Юпитером. Анализ длительности сближений / Н.Ю. Емельяненко // *Астрон. Вестн.* – 2003. – Т. 37. – № 2. – С. 153–160.

21. Емельяненко, Н.Ю. Модели низкоскоростных сближений комет с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2003. – Т. 9. – № 4. – С. 113–116.

22. Емельяненко, Н.Ю. Модели комет с неафелийным касанием орбиты Юпитера. Апсидальные точки расположены на орбите Юпитера / Н.Ю. Емельяненко // *Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика, Физика, Химия”.* – 2005. – Вып. 6. – № 6(46). – С. 24–30.

23. Емельяненко, Н.Ю. Влияние несферичности фигуры Юпитера на низкоскоростные сближения кометы / Н.Ю. Емельяненко, К.С. Заварухин // *Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика, Физика, Химия”.* – 2005. – Вып. 6. – № 6(46). – С. 31–35.

24. Емельяненко, Н.Ю. Кратные минимумы в сближениях комет с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // *Труды Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга.* – 2005. – Т. 78. – С. 16.

25. Емельяненко, Н.Ю. Низкоскоростные сближения комет с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // *Всероссийская конференция “Астероидно-кометная*

опасность – 2005”. Материалы конференции – Санкт-Петербург: ИПА РАН. – 2005. – С. 115–117.

26. Емельяненко, Н.Ю. Модели комет с неапсидальным касанием орбиты Юпитера / Н.Ю. Емельяненко // Сборник трудов Международной конференции “Околосемная астрономия – 2005”. Казань. – 2005. – С. 236–248.

27. Емельяненко, Н.Ю. Моделирование орбит комет с фиксированным положением апсидальных точек / Н.Ю. Емельяненко // Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика, Физика, Химия”. – 2006. – Вып. 7. – С. 21–28.

28. Емельяненко, Н.Ю. Моделирование орбит комет с фиксированным положением точек низкоскоростного касания / Н.Ю. Емельяненко // Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика, Физика, Химия”. – 2006. – Вып. 7. – С. 29–36.

29. Emel'yanenko, N.Yu. Orbital evolution of short-period comets with high values of the Tisserand constant // Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk, Proceedings of IAU Symposium 236. – 2007. – P. 35–42.

30. Емельяненко Н.Ю. Качественный анализ сближений комет с Юпитером // Труды Всероссийской астрономической конференции “ВАК–2007” – 2007. – С. 102–103.

31. Емельяненко, Н.Ю. Анализ орбитальной эволюции короткопериодических комет / Н.Ю. Емельяненко // Труды Международной конференции “Околосемная астрономия–2007” – 2007. – С. 56–57.

32. Емельяненко, Н.Ю. Анализ движения ядер кометы Шумейкер–Леви 9 в области сближения с Юпитером / Н.Ю. Емельяненко // Труды Международной конференции “Околосемная астрономия – 2007” – 2007. – С. 61–67.

Цитируемая литература

1. Everhart, E. Implicit single–sequence methods for integrating orbits / E. Everhart // Celest. Mech. – 1974. – V. 10. – No. 1. – P. 35–55.

2. Chambers J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies / J.E. Chambers // MNRAS. – 1999. – V. 304. – P. 793–799.
3. Standish, E.M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE403/LE403 / E.M. Standish, X.X.Newhall, J.G. Williams, W.M. Folkner // Technical Report 314.10–127. – JPL Interoffice Memorandum. : – 1995. – 22 p.
4. Marsden, B.G. Catalogue of Cometary Orbits / B.G. Marsden, G.V. Williams // Cambridge: Smithson. Astrophys. Observ. : – 2003. – 101 p.
5. Everhart, E. The evolution of comet orbits, perturbed by Uranus and Neptune / E. Everhart // –Comets, asteroids, meteorites. Proc. of IAU Coll. №39, A.H. Delsemme ed. – Toledo. : Univ. of Toledo Press. – 1977. – P. 99–104.
6. Carusi, A. Strong perturbations an close encounters with Jupiter / A. Carusi, G.B. Valsecchi // Sum and Planetaru System (W. Fricke. G. Teleki eds.). – Dordrecht : Reidel. – 1982. – P. 379–384.
7. Carusi, A. Planetary close encounters: importance of nearly tangent orbits / A. Carusi, G.B. Valsecchi // The Moon and the Planets. – 1980. – No. 22. – P. 113–124.
8. Субботин, М.Ф. Введение в теоретическую астрономию / М.Ф. Субботин. – М. : Наука, 1968. – 798 с.
9. Рой, А.Е. Движение по орбитам /А.Е. Рой; пер. С.А. Мирера. – М. : Мир, 1981. – 544 с.
10. Абалакин, В.К. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / В.К. Абалакин, Е.П. Аксенов, Е.А. Гребенников, В.Г. Демин, Ю.А. Рябов. – М. : Наука, 1976. – 864 с.

Н.С.Семин