

УДК 523.24, 523.68

А. М. Казанцев

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053

Поиск источника ядер короткопериодических комет. Направление пространственной миграции комет

Предпринята попытка установить пространственное расположение главного источника ядер короткопериодических комет. На основании численных расчетов эволюции орбит комет семейства Юпитера, среднепериодических комет и тел группы Кентавров показано, что эволюция орбит малых тел Солнечной системы происходит преимущественно в направлении увеличения больших полуосей. Это относится к телам, которые могут испытывать сближения с планетами и эволюция орбит которых происходит, в основном, за счет гравитационных возмущений. Сделан вывод, что главный источник ядер комет семейства Юпитера следует искать на расстояниях от Солнца не больше 6 а. е.

ПОШУК ДЖЕРЕЛА КОРОТКОПЕРІОДИЧНИХ КОМЕТ. НАПРЯМОК ПРОСТОРОВОЇ МІГРАЦІЇ КОМЕТ, Казанцев А. М. — Зроблено спробу встановити просторове положення головного джерела ядер короткопериодичних комет. На основі чисельних розрахунків еволюції орбіт комет сімейства Юпітера, середньоперіодичних комет та тіл групи Кентаврів показано, що еволюція орбіт малих тіл Сонячної системи відбувається переважно в напрямку збільшення великих півосей. Це стосується тіл, які можуть зазнавати зближень з планетами і еволюція орбіт яких відбувається, головним чином, за рахунок гравітаційних збурень. Зроблено висновок, що головне джерело ядер комет сімейства Юпітера слід шукати на відстанях від Сонця не більше 6 а. о.

A SEARCH FOR THE SOURCE OF SHORT-PERIOD COMET NUCLEI. THE DIRECTION OF SPATIAL COMET MIGRATION, by Kazan-tsev A. M. — An effort to determine the spatial location of the main source

of short-period comet nuclei is made. Some numerical calculations for the orbit evolution of Jupiter's family comets, comets with middle-period orbits, and Centaur's group bodies are carried out. The calculations show that orbit evolutions for small bodies of the solar system proceed mainly in the direction of an increase of semi-major axes. This relates to the bodies which can undergo encounters with planets and orbit evolutions of which occur mainly due to gravitational perturbations. The conclusion is made that there is good reason to search the main source of the nuclei for Jupiter's family comets at distances not more than 6 AU from the Sun.

ВВЕДЕНИЕ

Еще четверть века назад наука имела значительно меньше данных о малых телах Солнечной системы, чем сейчас. В частности, это касается короткопериодических комет (КПК). Вместе с тем проблема происхождения КПК казалась более ясной. Большинство исследователей считали, что КПК перешли на свои орбиты из долгопериодических комет (ДПК). Отдельно бытовала гипотеза профессора С. К. Всехсвятского [1] об эруптивном происхождении КПК (вулканическое извержение из спутников Юпитера). После открытия пояса Койпера, который оказался весьма вероятным резервуаром готовых кометных ядер, происхождение КПК стало выглядеть по иному. Теперь КПК не обязательно генетически связывают с ДПК. Одни исследователи считают источником КПК сам пояс Койпера [12], другие отдают предпочтение группе Кентавров [9]. Эруптивная гипотеза Всехсвятского получила развитие в работах Е. М. Дробышевского [8], где был разработан механизм взрывов льдов на поверхности галилеевых спутников Юпитера. Отдельно можно упомянуть гипотезу С. В. Орлова о возможности происхождения КПК из астероидов [6], причем переход на эксцентриситетные орбиты предполагался за счет взаимных столкновений малых планет. Данная гипотеза тогда не получила поддержки, поскольку подобный механизм изменения орбит был мало обоснован. Автором настоящей статьи в работе [3], а также в совместной работе с Л. М. Шербаум [7] было высказано предположение о происхождении КПК из астероидов. При этом для перехода астероидов на орбиты с большими эксцентриситетами взаимные столкновения не привлекались. Для такого перехода большая полуось орбиты астероида должна лежать в области соизмеримости по средним движениям с Юпитером (3 : 1, 5 : 2 или 2 : 1). Сейчас уже считается установленным, что в областях соизмеримостей с Юпитером, которым соответствуют люки Кирквуда, эксцентриситеты орбит могут достигать больших значений.

Предположение о происхождении КПК из астероидов раньше казалось необоснованным. Однако в настоящее время существование такого класса тел, как «кометы главного пояса» (МВС) делает высказанное предположение более реальным. Так, в работе [2] А. Ф. Заусаев и А. А. Заусаев на основании анализа элементов орбит КПК и астероидов сделали вывод о возможности происхождения некоторой части

этих комет из астероидов, движущихся на внешнем крае главного пояса. Остальная часть КПК, по их мнению, могла произойти из реликтовых резервуаров кометных ядер, движущихся между орбитами планет-гигантов. На сегодня подобные резервуары тел не обнаружены. Этот факт наряду с фактом наличия мощных наблюдательных инструментов (в том числе и космических) ставит под сомнение реальность существования тел такого класса. Что касается количественного вклада астероидов в популяцию КПК, то подобная оценка в работе [2] не приведена.

В последние годы накоплено много новых данных об орбитальных и физических свойствах КПК, проведены космические эксперименты «Deer Impact» и «Star Dust». Все же ни одна из высказанных ранее гипотез о происхождении КПК не стала общепринятой. Возможно, эксперимент «Розетта» с посадкой на ядро кометы 67/P сможет дать информацию, достаточную для решения этой проблемы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблему происхождения КПК можно условно разделить на две части: физико-химическую и орбитальную. Первая часть проблемы должна решить вопрос о составе и структуре ядер КПК. Вторая часть должна объяснить переход ядер комет на орбиты наблюдаемых КПК. Ведь понятно, что на таких орбитах тела не могут находиться очень долго (миллионы или даже миллиарды лет).

В настоящей работе мы рассмотрим вторую часть проблемы. Для поиска источника ядер КПК целесообразно разделить Солнечную систему на две части по орбите Юпитера. Некоторые из возможных названных выше источников ядер КПК расположены ближе к Солнцу, чем Юпитер, или же на его орбите (внутренние источники). Все остальные — заметно дальше от Солнца (внешние источники).

Предлагаемый подход решения рассматриваемой задачи состоит в следующем.

1. Вычисляется эволюция орбит комет семейства Юпитера на длительные интервалы времени и оценивается направление и характерное время их перехода на принципиально другие орбиты (либо за пределы орбиты Юпитера, либо глубоко внутрь планетной системы).

2. Вычисляется эволюция орбит тел за пределами орбиты Юпитера, являющихся возможными источниками новых комет семейства Юпитера.

3. На основании расчетов оценивается соотношение выхода комет семейства Юпитера и их пополнения извне.

ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА

Для анализа были отобраны кометы семейства Юпитера (КСЮ) с афелийными расстояниями $Q < 6$ а. е. Чаще КСЮ отбирают и с большими

значениями Q . Наше более жесткое ограничение объясняется введенным принципом деления Солнечной системы на две части (по орбите Юпитера). В каталогах на MPC на конец 2010 г. комет с такими параметрами можно отыскать больше 250. После исключения из списка комет, которые не наблюдались больше чем три сидерических периода, их количество стало равным 210. Элементы орбит всех комет были приведены на эпоху 23.07.2010 г.

Численные расчеты эволюции орбит выполнялись по методу, описанном в работе [4]. Учитывались возмущения от всех восьми планет, негравитационные эффекты (НГЭ) не учитывались. Это потому, что точные параметры НГЭ для большинства комет не определены. Кроме того, НГЭ заметно изменяются даже за несколько оборотов кометы, поэтому их учет на длительных интервалах (тысячи лет) лишен смысла. Понятно, что установить точный ход эволюции отдельной орбиты кометы на длительные интервалы невозможно. Тем не менее, при интегрировании большого количества орбит некоторые общие закономерности их эволюции можно выявить достаточно уверенно.

Интервалы интегрирования для всех тел составляли до 100000 лет. В различные моменты времени эволюции фиксировалось количество комет, оставшихся в группе (N_{Jc+}), и количество комет, перешедших на орбиты с $Q > 6$ а. е. (N_{Jc-}). Соответствующие данные представлены в табл. 1. Видно, что количество КСЮ нашей группы систематически уменьшается со временем, причем к концу интегрирования скорость уменьшения падает. Так, за первые сто лет количество орбит сократилось на 22, за 500 лет — на 58, через 2 тысячи лет — в два раза. Через 10 тысяч лет осталось 75 (около 35 % орбит). После этого численность группы стала уменьшаться крайне медленно, и на интервале 40000—100000 лет количество КСЮ составляет около 30. Это объяс-

Таблица 1. Изменение со временем количества тел в группах разных популяций

| T_y , лет | N_{Jc+} | N_{Jc-} | N_{sp} | N_{ct} | N_{spect} |
|-------------|-----------|-----------|----------|----------|-------------|
| 0 | 210 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 205 | 5 | 3 | 0 | 3 |
| 40 | 204 | 6 | 4 | 0 | 4 |
| 100 | 188 | 22 | 6 | 0 | 6 |
| 200 | 175 | 35 | 8 | 0 | 8 |
| 400 | 146 | 65 | 14 | 0 | 14 |
| 500 | 152 | 58 | 17 | 0 | 17 |
| 1000 | 132 | 78 | 22 | 0 | 22 |
| 2000 | 111 | 99 | 35 | 3 | 38 |
| 5000 | 87 | 123 | 37 | 5 | 42 |
| 10000 | 75 | 135 | 32 | 8 | 40 |
| 20000 | 44 | 166 | 27 | 8 | 35 |
| 40000 | 35 | 175 | 23 | 9 | 32 |
| 60000 | 30 | 180 | 16 | 18 | 34 |
| 80000 | 26 | 184 | 11 | 4 | 15 |
| 100000 | 29 | 181 | 9 | 7 | 16 |

няется тем, что в группе остались в основном кометы, избегающие сближений с Юпитером либо за счет малых афелийных расстояний ($Q < 4.6$ а. е.), либо за счет пребывания в одной из соизмеримостей с Юпитером. В последнем случае большие полуоси орбит периодически колеблются относительно некоторого значения a_0 , соответствующего данной соизмеримости.

Если орбита даже с большим афелийным расстоянием находится в соизмеримости, то тело на такой орбите в течение длительного периода может избегать сближений с Юпитером. В одних соизмеримостях (например $2 : 1$, $a_0 = 3.28$ а. е.) такие периоды составляют десятки тысяч лет. В соизмеримости $3:2$ (группа Гильды, $a_0 = 3.97$ а. е.) тела могут миллионы и даже миллиарды лет не испытывать сближений с Юпитером (при условии, что движение тел происходит лишь под действием гравитационных сил). Если есть некоторые НГЭ, то выход из соизмеримости и сближения с Юпитером могут происходить намного быстрее. Ведь само существование орбит в соизмеримостях обусловлено исключительно гравитационными силами. Вмешательство других сил будет приводить к нарушению установленного резонанса, и как следствие — к выходу орбит из соизмеримости.

В принципе КСЮ могут исчезнуть намного раньше за счет дезинтеграции летучих веществ на их поверхностях. По самым скромным оценкам [10, 11] средняя скорость падения блеска КСЮ составляет от 0.2 до 0.6^m за сто лет. Следовательно, в виде комет такие тела должны существовать не больше 2000 лет. Во избежание лишней дискуссии вопросы дезинтеграции КСЮ рассматривать не будем. В любом случае для постоянства определенного уровня численности КСЮ необходимо их пополнение.

ПОПОЛНЕНИЕ КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА ЗА СЧЕТ СРЕДНЕПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

Как уже отмечено выше, в настоящее время рассматривается несколько возможных источников КСЮ за пределами орбиты Юпитера (кометы с большими периодами, Кентавры и тела пояса Койпера). Внешние кометы обычно разделяются на два класса ДПК и среднепериодические кометы (СПК). Если периоды ДПК составляют тысячи лет и даже больше, то к СПК обычно относят кометы с периодами в десятки и сотни лет. Для нашей задачи ДПК как источник КСЮ можно вообще не рассматривать. Ведь вероятность их сближений с планетами намного меньше, чем у СПК. Поэтому нами были отобраны кометы с периодами не больше 200 лет и с афелийными расстояниями $Q > 6.1$ а. е. Значение Q для СПК выбрано на 0.1 а. е. больше, чем для КСЮ, чтобы эти группы четче отделялись друг от друга. В каталогах MPC на конец 2010 г. таких комет оказалось 211.

Поскольку среднепериодические кометы могут двигаться заметно дальше от Земли и от Солнца, то, в отличие от КСЮ, в каталогах пред-

Таблица 2. Распределения числа среднепериодических комет по перигелийному расстоянию и по периоду обращения

| q , а. е. | N_q | P , лет | N_P |
|-------------|-------|-------------|-------|
| 0.0—1.0 | 18 | до 10.0 | 40 |
| 1.0—2.0 | 70 | 10.0—20.0 | 94 |
| 2.0—3.0 | 65 | 20.0—40.0 | 28 |
| 3.0—4.0 | 19 | 40.0—60.0 | 12 |
| 4.0—5.0 | 23 | 60.0—80.0 | 15 |
| 5.0—6.0 | 10 | 80.0—100.0 | 6 |
| 6.0—10.0 | 5 | 100.0—130.0 | 6 |
| 10.0—12.0 | 1 | 130.0—200.0 | 10 |

ставлены не все такие тела. Для оценки количества необнаруженных СПК рассмотрим их распределения по перигелийному расстоянию q и периоду P (табл. 2). Из таблицы можно видеть, что количество среднепериодических комет с $q < 5$ а. е. составляет 195, т. е. 92 % тел выборки. На орбитах с такими перигелийными расстояниями движутся все КСЮ, и кометная активность на таких расстояниях от Солнца легко обнаруживается современными наблюдательными средствами. Поэтому неоткрытые СПК могут быть на орбитах с большими значениями q . Однако на таких расстояниях от Солнца кометная активность проявляется лишь у некоторых комет, и там кометные ядра фактически попадают в группу Кентавров. Поэтому количество реально существующих СПК в выбранном интервале орбит не должно сильно отличаться от количества в нашей выборке.

Распределение числа СПК по периодам обращения подтверждает этот вывод. Из табл. 2 видно, что количество тел с периодами до 40 лет составляет 162 (больше 75 %). Астрономические инструменты, используемые с начала 1970-х гг. в состоянии обнаруживать практически все кометы в указанном диапазоне перигелийных расстояний.

Все же для учета возможно существующих, но еще не обнаруженных СПК количество нашей выборки этих тел было увеличено в два раза. К реальным СПК было добавлено такое же количество искусственных. Каждой реальной СПК соответствовала одна искусственная, элементы орбит которой отличались от своих реальных «прототипов» только значением средней аномалии. Такое увеличение количества СПК должно с лихвой перекрыть количество неоткрытых комет.

Были выполнены численные расчеты эволюции орбит отобранных комет с теми же условиями, что и КСЮ. В ходе расчетов фиксировалось количество комет, перешедших в группу КСЮ. Условием такого перехода принималось условие $Q < 6$ а. е. Количество СПК, перешедших в различные моменты времени в КСЮ, представлено в табл. 1. Здесь сразу следует отметить, что для расчетов было использовано две отдельные группы искусственных комет. В одной группе средние аномалии отличались от реальных на 180° , а в другой — на 90° . Количество тел, перешедших из каждой группы в популяцию КСЮ, в отдель-

ные моменты времени отличались не существенно. В таблице использованы средние значения этих количеств.

Из табл. 1 видно, что первые несколько тысяч лет количество СПК, перешедших в КСЮ, увеличивается со временем, достигая в отдельные моменты 30—40, а потом начинает уменьшаться. К концу интегрирования их количество составляет около 10. Такой ход изменения численности объясняется тем, что вначале в пополнении популяции КСЮ участвуют все 422 СПК. Однако в ходе эволюции СПК переходят не только внутрь планетной системы, но и наружу. При этом их отток наружу происходит более интенсивно, чем внутрь. Ниже эта особенность эволюции орбит будет рассмотрена более детально.

ПОПОЛНЕНИЕ КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА ЗА СЧЕТ КЕНТАВРОВ

Группа Кентавров представляет единственный резервуар малых тел за пределами орбиты Юпитера, которые не являются кометами, но могут пополнять население КСЮ. Естественно, есть еще и громадное количество тел в поясе Койпера, который также может в принципе рассматриваться как один из источников ядер КСЮ. Однако, чтобы попасть в группу КСЮ, тела из пояса Койпера обязательно должны пройти зону Кентавров. Поэтому приток КСЮ из Кентавров автоматически включает и пополнение из пояса Койпера.

Четкого определения понятия Кентавров нет. Считается, что Кентавры — тела, которые движутся между орбитами Юпитера и Нептуна. При этом не уточняется, полностью ли орбиты этих тел расположены в указанной зоне, или в перигелии они могут быть ближе к Солнцу, чем Юпитер, а в афелии — дальше, чем Нептун. Для нашей задачи были выбраны следующие диапазоны элементов орбит Кентавров: большие полуоси — от 6 до 25 а. е., эксцентриситеты — от 0 до 1.0, наклоны — от 0 до 180°, афелийные расстояния — от 6.0 до 30 а. е., перигелийные расстояния — от 0 до 9.6 а. е. Условие $q < 9.6$ а. е. означает, что отобранные Кентавры имеют возможность сблизиться с Сатурном. Телам, которые постоянно движутся за орбитой Сатурна, для перехода в группу КСЮ потребуется намного больше времени, и их в наших расчетах можно не учитывать.

Для оценки возможного вклада Кентавров в КСЮ необходимо вначале определить, хотя бы приблизительно, количество реально существующих Кентавров в указанном интервале элементов орбит и в определенном интервале размеров. В нашем случае был выбран минимальный размер Кентавров $D_m = 1.0$ км, что примерно соответствует минимальному диаметру ядер КСЮ. В каталоге Международного центра малых планет MPC на начало 2011 г. тел с указанными элементами орбит насчитывается 70. Поскольку размеры Кентавров в каталогах не указаны, значения тел можно оценить приблизительно по их абсолютной звездной величине H . Если известно геометрическое альбе-

до тела p_v , то его размер D сравнительно точно определяют по стандартной формуле

$$2 \lg D - 6.259 - 0.4H = \lg p_v. \quad (1)$$

В случае, когда альbedo неизвестно, для оценки размеров астероидов принимается некоторое среднее его значение. Чаще всего используется упрощенная формула в следующей форме:

$$D \text{ (км)} = 10^{0.2(18 - H)}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что в данном случае среднее значение $p_v = 0.11$. Это близко к среднему значению альbedo для главного пояса астероидов. Из выражения (2) видно, что размеру тела 1 км соответствует абсолютная звездная величина 18^m .

При оценке количества реально существующих тел в определенном интервале размеров обычно используют степенной закон распределения:

$$dN = kD^{-p} dD, \quad (3)$$

где dN — количество существующих тел с размерами, близкими к D в интервале dD . С учетом (2) и (3) должна осуществляться линейная зависимость $\lg N(H)$, где N — количество реально существующих тел с абсолютными звездными величинами не больше H . Такая зависимость, построенная для нашей выборки Кентавров, приведена на рис. 1. Точками отмечена зависимость для реальных (открытых) тел выборки, штриховой линией — теоретическая зависимость, проведенная по линейному участку реальной зависимости. На участке, где теоретическая и реальная зависимости приблизительно совпадают, все тела с такими значениями H уже открыты. В нашем случае должны быть открыты тела с $H < 13.5^m$. Отклонение между реальной и теоретической зависимостями начинается при тех значениях H , при которых открыты не все существующие тела. Из полученной теоретической зависимости следует, что количество реально существующих Кентавров с $D > 1$ км ($H < 18^m$) должно быть около 300.

Для численных расчетов к 70 орбитам реальных Кентавров было добавлено 280 модельных орбит. Одной реальной орбите соответствовали четыре модельные орбиты, элементы которых отличались от ре-

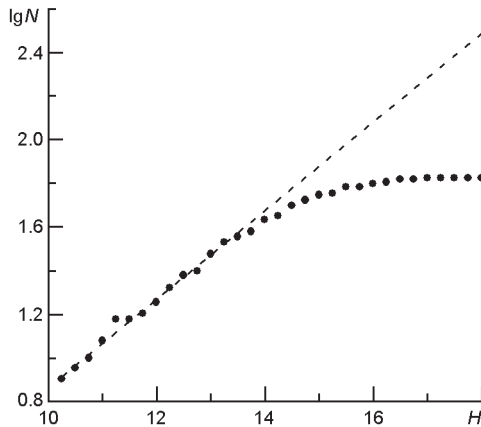


Рис. 1. Наблюдаемая (точки) и теоретическая (штриховая линия) зависимости $\lg N(H)$ для Кентавров

альных только значениями средних аномалий, равными 0, 90, 180 и 270. Таким образом, количество интегрируемых орбит Кентавров составляло 350. Численные расчеты выполнялись с описанными выше условиями. Как и в случае СПК, в ходе расчетов фиксировалось количество Кентавров, перешедших в группу КСЮ. Условием такого перехода принималось условие $Q < 6$ а. е. Количество Кентавров, перешедших в различные моменты времени в КСЮ, также представлено в табл. 1. Из таблицы видно, что Кентавры менее интенсивно пополняют численность группы КСЮ, чем СПК. Суммарное количество СПК и Кентавров, перешедших в КСЮ в отдельные моменты времени (N_{spct}) содержится в следующем столбце таблицы. Для наглядности данные табл. 1 представлены на рис. 2.

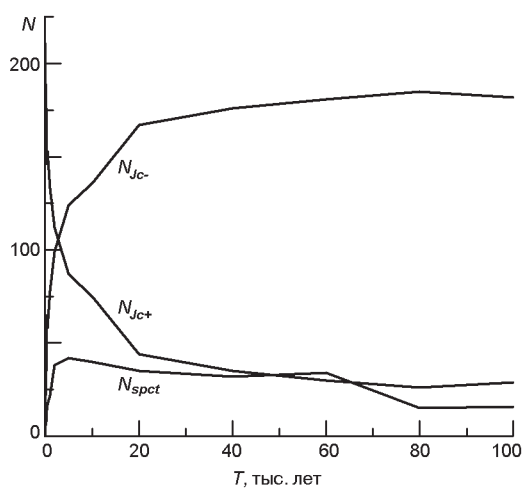


Рис. 2. Зависимости для оттока и пополнения численности популяции комет семейства Юпитера

Видно, что скорость пополнение группы КСЮ из внешних источников во все моменты рассмотренного интервала интегрирования в 3-4 раза меньше скорости оттока комет из данной группы. При этом в наших расчетах количество потенциально возможных кометных ядер на внешних орбитах почти в четыре раза превышает количество КСЮ. Таким образом, пополнение численности КСЮ должно происходить в основном из внутренних источников.

Полученный результат о более интенсивном выходе КСЮ из группы по сравнению с их пополнением извне не является следствием какого-либо особого положения орбиты Юпитера в пространстве. Преимущественное увеличение больших полуосей орбит характерно и для тел, движущихся за пределами орбиты Юпитера: СПК и Кентавров. На это указывают результаты численных расчетов эволюции орбит этих тел. В табл. 3 представлены данные об изменении больших полуосей их орбит со временем. Изменение значений a определялось в три разных момента T_a после начала интегрирования: через 400, 10000 и 100000 лет. Значения N_{a+} показывают относительное количество орбит, у которых большие полуоси в моменты T_a стали больше исходных, N_{a-} — количество орбит с уменьшенными a , N_n — количество тел, перешедших на параболические или гиперболические орбиты.

Таблица 3. Данные о направлении изменения больших полуосей орбит СПК и Кентавров

| T_a , лет | СПК | | | Кентавры | | |
|-------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | N_n | N_{a+} | N_{a-} | N_n | N_{a+} | N_{a-} |
| 400 | 0 | 52.8 | 47.2 | 0 | 50.3 | 49.7 |
| 10000 | 23 | 64.0 | 36.0 | 12 | 54.0 | 46.0 |
| 100000 | 152 | 84.4 | 15.6 | 87 | 69.7 | 30.3 |

Из таблицы видно, что доля орбит с увеличенными большими полуосями обеих групп тел увеличивается со временем. Другими словами, увеличение больших полуосей орбит малых тел, движущихся вблизи планет-гигантов, является закономерным процессом, а пополнение численности КСЮ должно происходить главным образом из внутренних источников.

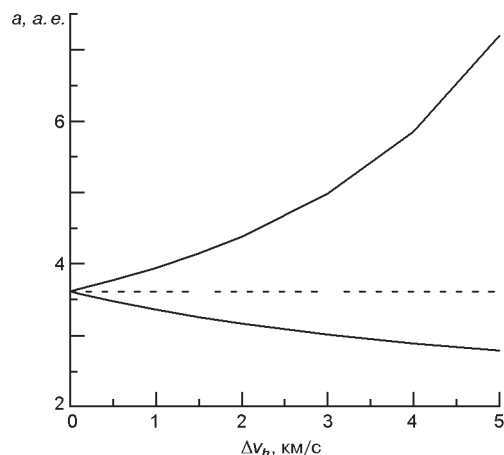
НЕКОТОРАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Понятно, что приведенный выше результат о преимущественном увеличении больших полуосей орбит малых тел Солнечной системы за длительные интервалы времени относится к телам, которые могут испытывать сближения с планетами и эволюция орбит которых происходит в основном за счет гравитационных возмущений. Качественно это можно объяснить механизмом сближения малого тела с планетой. При сближении под действием гравитационного поля планеты происходит поворот вектора планетоцентрической скорости малого тела \mathbf{v}_p , которая является гиперболической, т. е. больше второй космической скорости для планеты. При этом на одинаковых расстояниях от планеты до и после сближения модуль \mathbf{v}_p остается одинаковым. Поворот вектора \mathbf{v}_p приводит к изменению не только вектора, но и модуля гелиоцентрической скорости малого тела \mathbf{v}_h . На гелиоцентрическом расстоянии r большая полуось гелиоцентрической орбиты a связана с \mathbf{v}_h через интеграл энергии:

$$v_h^2 = 2/r - 1/a. \quad (4)$$

В некотором приближении можно принять, что сближение происходит при постоянном значении r . В зависимости от направления поворота вектора \mathbf{v}_p модуль \mathbf{v}_h может как увеличиваться, так и уменьшаться. При этом степени увеличения и уменьшения модуля \mathbf{v}_h приблизительно равны. Однако изменение большой полуоси происходит далеко не так симметрично. При изменении модуля \mathbf{v}_h в некотором диапазоне \mathbf{v}_h увеличение a происходит в большей степени, чем уменьшение. Асимметрия в изменении большой полуоси возрастает с расширением диапазона величины \mathbf{v}_h .

Рис. 3. Увеличение и уменьшение большой полуоси a орбиты малого тела в результате сближения с планетой при разных значениях изменения v_h , км/с гелиоцентрической скорости



Наглядное количественное представление об этой асимметричности, полученное из выражения (4), представлено на рис. 3. Здесь по горизонтальной оси — модуль изменения гелиоцентрической скорости малого тела при сближении (v_h), по вертикальной — увеличение и уменьшение большой полуоси орбиты тела, соответствующие значениям v_h . Для примера выбрана типичная орбита КСЮ с элементами: $a = 6.62$ а. е., $e = 0.44$. Модельное сближение происходит с Юпитером на гелиоцентрическом расстоянии 5.2 а. е. Увеличение большой полуоси по абсолютной величине превышает уменьшение на всем интервале значений v_h .

Вполне понятно, что значение большой полуоси эллиптической орбиты малого тела после сближения с планетой не может быть меньше половины гелиоцентрического расстояния, на котором происходит сближение. Условие $a = 0.5r$ наступит, если гелиоцентрическая скорость станет равной нулю, т. е. орбита малого тела превратится в вырожденный эллипс (отрезок прямой). Увеличение большой полуоси после сближения формально не ограничено, и тело может выходить на параболическую или даже гиперболическую орбиту. В случае постепенного увеличения большой полуоси тело от орбиты Юпитера переходит к орбитам далеких планет (Сатурна, Урана и Нептуна). При сближениях с этими планетами увеличение a также превалирует над уменьшением, вследствие чего малое тело постепенно выходит во внешние зоны планетной системы или далеко за ее пределы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученный результат о преимущественном увеличении больших полуосей орбит малых тел Солнечной системы за длительные интервалы времени в ходе эволюции не является неожиданным. Этот результат сравнительно просто вытекает из интеграла энергии (4) и хорошо подтверждается численными расчетами. Однако остается вопрос, насколько уверенно на его основе можно делать выбор о пространствен-

ном расположении главного источника ядер КСЮ. Здесь решающую роль играет соотношение между интенсивностями оттока и притока КСЮ и реальными количествами тел, влияющими на процесс обмена. В данном случае речь идет о количествах КСЮ и потенциальных ядер этих комет на внешних орбитах. Количество КСЮ определяется довольно уверенно, поскольку все такие тела легко обнаруживаются.

Вопрос о количестве потенциальных ядер во внешних источниках не настолько простой. Перечень популяций таких тел не вызывает сомнений — это кометы на среднепериодических орбитах и тела группы Кентавров. Но количество тел в каждой из этих популяций в нынешних каталогах не полное. Как уже показано выше, искусственное увеличение в два раза количества наблюдаемых СПК должно с запасом перекрыть неоткрытые кометы.

Количество реально существующих Кентавров было оценено на основании степенного закона их распределения по размерам. Для астероидов главного пояса такой подход дает приемлемые результаты. Для Кентавров степенной закон распределения по размерам может и не выполняться. Тогда принятое их количество (350) может не совпадать с реальным. Тем не менее, сделанный в работе вывод не изменится. Во-первых, как видно из табл. 1, Кентавры переходят на орбиты КСЮ не так интенсивно, как СПК. Это потому, что перигелийные расстояния орбит Кентавров преимущественно удалены от орбит планет-гигантов [5]. Во-вторых (и это более важно), лишь незначительное количество Кентавров, перешедших на орбиты КСЮ, могут проявлять кометную активность. Около 60 % наблюдаемых на сегодня Кентавров имеют перигелийные расстояния орбит $q < 3$ а. е., но при этом не являются кометами. Следовательно, из представленных в табл. 1 Кентавров, перешедших на орбиты КСЮ, пополнить популяцию данных комет может лишь малая часть. Поэтому главным возможным источником КСЮ на внешних орбитах являются СПК. Приток же этих тел в группу КСЮ в 4-5 раз меньше оттока.

Если оценивать интенсивность оттока и притока в долях исходного количества, то соотношение выглядит еще более контрастным. Из данных табл. 1 можно получить, что на интервале 500—100000 лет эволюции число КСЮ уменьшается на величину от 30 до 87 %. На том же интервале суммарное количество СПК и Кентавров, перешедших на орбиты КСЮ, составляет от 2 до 5.4 % от их исходного количества. То есть, интенсивность оттока больше чем на порядок превышает интенсивность притока.

ВЫВОДЫ

1. Эволюция орбит малых тел Солнечной системы происходит преимущественно в направлении увеличения больших полуосей. Это относится к телам, которые могут испытывать сближения с планетами и

эволюция орбит которых происходит в основном за счет гравитационных возмущений.

2. Главный источник ядер комет семейства Юпитера следует искать на расстояниях от Солнца, не превышающих 6 а. е.

1. *Всехсвятский С. К.* Новые доказательства эруптивного происхождения комет и метеоритного вещества // Астрон. журн.—1967.—**44**, № 3.—С. 595—604.
2. *Заусаев А. Ф., Заусаев А. А.* О природе происхождения короткопериодических комет. К вопросу об эволюции короткопериодических комет // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки.—2007.—№ 2 (15).—С. 145—150.
3. *Казанцев А. М.* Возможный механизм образования короткопериодических комет // Астрон. циркуляр.—1982.—№ 1215.—С. 6—7.
4. *Казанцев А. М.* Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов // Астрон. вестн.—2002.—**36**, № 1.—С. 48—54.
5. *Казанцев А. М.* Орбитальная структура пояса Койпера и его вклад в околоземный астероидно-метеорный комплекс // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 5.—С. 50—62.
6. *Орлов С. В.* Эволюция и происхождение комет // Астрон. журн.—1939.—**16**, № 1.—С. 3—27.
7. *Шербаум Л. М., Казанцев А. М.* Взаимосвязь малых тел солнечной системы // Вестник Киев. ун-та. Астрономия.—1985.—Вып. 27.—С. 66—73.
8. *Drobyshevskii E. M.* The eruptive evolution of the Galilean satellites — Implications for the ancient magnetic field of Jupiter // Moon and Planets.—1980.—**23**.—P. 483—491.
9. *Emel'yanenko V. V.* Structure and dynamics of the Centaur population: Constraints on the origin of short-period comets // Earth, Moon, and Planets.—2005.—**97**, N 3-4.—P. 341—351.
10. *Kresak L., Kresakova M.* Secular brightness decrease of periodic comets // Icarus.—1990.—**86**, N 1.—P. 82—92.
11. *Svoren J.* Secular decrease in the brightness of short-period comets // Contribs. Astron. Observ. Skalnaté Pleso.—1991.—**21**.—P. 15—49.
12. *Volk K., Malhotra R.* The scattered disk as the source of the Jupiter family comets // Astrophys. J.—2008.—**687**, N 1.—P. 714—725.

Поступила в редакцию 09.02.12