

УДК 523.24, 523.68

А. М. Казанцев

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ-53, 04053

Поиск источника ядер короткопериодических комет. Отбор среди разных групп астероидов

В продолжение предыдущей работы по поиску главного источника ядер комет семейства Юпитера (КСЮ) выполнен анализ распределений по угловым элементам орбит комет и астероидов различных групп. Проанализированы распределения КСЮ по аргументу перигелия и долготе перигелия. Показано, что подобные распределения не приобретены в процессе эволюции КСЮ на их нынешних орбитах. Подобных распределений $N(\dots)$ и $N(\dots)$ не имеют тела, перешедшие на орбиты КСЮ из внешних источников. В то же время распределения КСЮ по всем угловым элементам орбит очень близки к соответствующими распределениям Троянцев. Сделан вывод, что именно астероиды этой группы, скорее всего, являются главным источником ядер КСЮ.

ПОШУК ДЖЕРЕЛА КОРОТКОПЕРІОДИЧНИХ КОМЕТ. ВІДБІР СЕРЕД РІЗНИХ ГРУП АСТЕРОЇДІВ, Казанцев А. М. — Як продовження попередньої роботи автора щодо пошуків головного джерела ядер комет сімейства Юпітера (КСЮ) виконано аналіз розподілів по кутових елементах орбіт комет та астероїдів різних груп. Проаналізовано розподіли КСЮ по аргументу перигелію та довготі перигелію. Показано, що подібні розподіли не набуті у процесі еволюції КСЮ на їхніх теперішніх орбітах. Подібні розподіли $N(\dots)$ та $N(\dots)$ не мають тіла, що перейшли на орбіти КСЮ із зовнішніх джерел. В той же час розподіли КСЮ по всіх кутових елементах дуже близькі до відповідних розподілів Троянців. Зроблено висновок, що саме астероїди цієї групи, скоріше за все, є головним джерелом ядер КСЮ.

SEARCHING FOR THE SOURCE OF SHORT-PERIOD COMET NUCLEI. A SELECTION AMONG DIFFERENT ASTEROID GROUPS, by Kazantsev A. M. — The study continues our previous publications on

searching for the main source of nuclei of Jupiter family comets (JFCs). We analyze the distributions with the angular orbit elements of comets and asteroids from different groups. The distributions of JFCs with argument of perihelion and with longitude of perihelion are studied. It is revealed that these distributions were not formed during the evolution of JFCs on their current orbits. The bodies that passed into JFC orbits from external sources have not $N(\)$ and $N(\)$ distributions of these kinds. At the same time, the distributions of JFCs with all angular elements are very close to the corresponding distributions of Trojans. The conclusion is made that asteroids of just that group is likely the main source of JFCs nuclei.

ВВЕДЕНИЕ

В нашей предыдущей работе [1] на основании численных расчетов эволюции орбит комет семейства Юпитера (КСЮ), среднепериодических комет и тел группы Кентавров показано, что эволюция орбит малых тел Солнечной системы за длительные интервалы времени 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. Следовательно, пополнение из внешних источников (тела группы Кентавров и среднепериодические кометы) не сможет поддерживать современную численность КСЮ. На основании этого сделан обоснованный вывод, что главный источник ядер КСЮ следует искать на расстояниях от Солнца не больше 6 а. е.

В данной работе ставится задача найти на указанном расстоянии от Солнца конкретную группу малых тел, являющуюся главным источником ядер КСЮ. Понятно, что все эти группы относятся к астероидам. Еще лет двадцать назад подобная задача могла бы показаться несерьезной. В настоящее время ситуация существенно изменилась.

Так, в работе [4] проанализированы динамические и физические характеристики долгопериодических (ДПК) и короткопериодических комет (КПК). На основании орбитальных параметров сделан вывод, что ДПК приходят из облака Оорта, а КПК — из рассеянного диска пояса Койпера. Вместе с тем на основании выполненных исследований спектров комет разных популяций авторы работы делают вывод, что и ДПК, и КПК сформировались во внутренних зонах Солнечной системы и уже потом планетными возмущениями были переброшены на более удаленные от Солнца орбиты. Следовательно, можно ожидать, что химический состав некоторой части тел, находящихся в настоящую эпоху во внутренних зонах Солнечной системы (астероидов), может быть близок к химическому составу ядер комет. Этот вывод согласуется с результатами эксперимента Stardust, свидетельствующими о наличии хондритов в ядре кометы 81/P Wild 2 [2, 10]. Таким образом, гипотеза о происхождении КСЮ из астероидов теперь имеет некоторое физическое обоснование.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОЗМОЖНЫХ ГРУПП АСТЕРОИДОВ

В принципе можно рассматривать лишь три различные группы астероидов, претендующих на источник ядер КСЮ. Во-первых, это астероиды на внешнем краю главного пояса. Будем называть эти тела «группа 1». Их большие полуоси лежат в пределах 3.15...3.5 а. е. Большинство тел в этой зоне относятся к низкоальбедному С-типу с небольшой средней плотностью.

Вторая группа астероидов, рассматриваемая в качестве источника ядер КСЮ — это астероиды группы Гильды. Большие полуоси их орбит охватывают зону от 3.90 до 4.05 а. е. Третья группа астероидов — это «Троянцы» Юпитера. Большие полуоси их орбит находятся в соизмеримости 1:1 с Юпитером. Большинство астероидов группы Гильды и Троянцев относятся к D-типу и имеют сходные спектральные характеристики [8], близкие к характеристикам ядер КСЮ [5].

Большие полуоси орбит всех трех групп астероидов расположены в зоне больших полуосей большинства орбит КСЮ. Таким образом, по своим физическим свойствам и по расположению орбит в пространстве все три группы могут претендовать на роль главного источника ядер КСЮ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ ОРБИТ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА

Понятно, что астероиды, пополняющие численность КСЮ, должны иметь возможность переходить на орбиты с большими эксцентриситетами, характерными для КСЮ. Оказывается, что тела всех трех групп реально имеют такую возможность. Для объяснения сказанного рассмотрим распределение орбит всех групп астероидов и КСЮ в координатах большая полуось — эксцентриситет (рис. 1).

Здесь для всех трех групп обозначены орбиты астероидов с абсолютными звездными величинами $H < 18^m$, что приблизительно соответствует размерам $D > 1$ км. Орбиты астероидов отобраны из каталога Международного центра малых планет (МРС) на начало 2012 г.

Как и в работе [1], будем рассматривать КСЮ с афелийными расстояниями $Q < 6.0$ а. е. Таких орбит имеется 210. На рис. 1 они обозначены крестиками. Орбиты астероидов обозначены треугольниками. Различие между группами астероидов просто устанавливается по значениям больших полуосей. Понятно, что в зоне значений a , представленных на рис. 1, расположен весь главный пояс астероидов, не обозначенный орбитами на рисунке. Кроме того, между орбитами групп астероидов 1 и 2, а также 2 и 3 имеется относительно небольшое количество орбит астероидов. Ввиду их немногочисленности они не рассматриваются в качестве возможных источников ядер КСЮ и не обозначены на рис. 1. Из рисунка хорошо видно, что в координатах $a — e$ некоторая часть орбит групп 1 и 2 просто перемешаны с

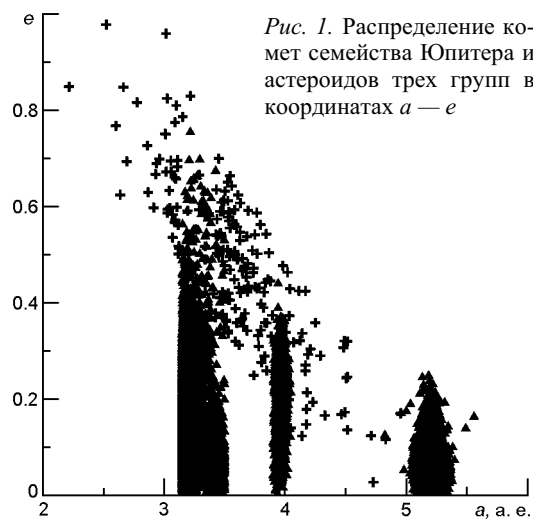


Рис. 1. Распределение комет семейства Юпитера и астероидов трех групп в координатах $a - e$

орбитами КСЮ. Орбиты группы 3 (Троянцы) также расположены недалеко от орбит комет.

Большие эксцентриситеты орбит астероидов группы 1 объясняются их близостью к соизмеримости 2:1 с Юпитером. Известно, что в области соизмеримости эксцентриситеты орбит могут заметно увеличиваться. Точной соизмеримости 2:1 соответствует значение большой полуоси $a = 3.28$ а. е. Если эксцентриситет орбиты асте-

роида составляет 0.15...0.20, то такая орбита может попасть в соизмеримость и при значении большой полуоси 3.21...3.23 а. е. В иных случаях орбиты астероидов могут переходить в соизмеримость после столкновений с другими телами.

Орбиты астероидов группы Гильды уже находятся в соизмеримости 4:3 с Юпитером, поэтому могут и без столкновений приобретать большие значения эксцентриситетов. Эксцентриситеты орбит Троянцев относительно небольшие, но в координатах $a - e$ эти орбиты также соседствуют с орбитами КСЮ.

Характерное распределение КСЮ в координатах $a - e$ просто объясняется эволюцией их орбит. На рис. 2 представлены изменения элементов a и e нескольких орбит КСЮ на интервалах до 1000 лет. Численные расчеты выполнены по методу и программе, описанными в работе [1]. Уменьшение больших полуосей орбит в среднем сопровождается увеличением эксцентриситетов. Подобный ход изменения элементов обеспечивает почти постоянными значения афелийных расстояний орбит Q .

Из рис. 1 и 2 видна возможность астероидов всех трех групп довольно просто перейти на орбиты, характерные для КСЮ. Пока астероиды находятся в соизмеримостях (2:1, 4:3 или 1:1), то они остаются в своих группах. Но при выходе из соизмеримости тела могут испытывать сближения с Юпитером, и тогда эволюция их орбит будет идти по трекам, представленным на рис. 2. Тела перейдут в ту область фазового пространства a, e , которую занимают КСЮ.

Указанный на рис. 2 ход эволюции орбит дает и физическое обоснование превращения астероидов в кометы. Потенциальные кометные ядра среди каждой из групп должны иметь летучие вещества, залегающие на небольших глубинах под поверхностями. Их выход на поверхность может достигаться при прогревании солнечной энергией соответствующих слоев. Это приведет к увеличению давления под поверхностью и сбрасываний верхней корки. Понятно, что для этого те-

ло должно подойти близко к Солнцу. Но ведь изменение элементов a — e (рис. 2), при котором афелийные расстояния изменяется незначительно, приводит к существенным изменениям перигелийных расстояний. При $a = 4.5$ а. е. интервал значений q КСЮ составляет от 2.8 до 3.8 а. е., но при $a = 3.0$ а. е. — уже от 0.45 до 1.5 а. е. Таким образом, и астероиды внешнего края главного

пояса, и тела группы Гильды, и Троянцы могут описанным выше путем переходить на орбиты с очень малыми значениями перигелийных расстояний. Имея на небольших глубинах летучие вещества, такие тела становятся кометами. Это происходит в тот период, когда тело пребывает на орбите с относительно небольшим значениям большой полуоси ($a < 3.5$ а. е.). После сбрасывания верхней корки тело может проявлять кометную активность и на больших расстояниях от Солнца.

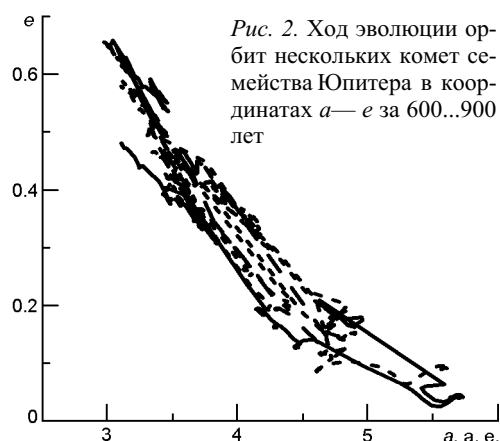
Описанный здесь механизм перехода астероидов из трех отмеченных групп в КСЮ не требует каких-либо маловероятных предположений и допущений. Главное, чтобы тела содержали некоторую часть летучих веществ на небольших глубинах относительно своих поверхностей.

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА АСТЕРОИДОВ В КАЖДОЙ ИЗ ГРУПП

На основании распределения орбит КСЮ в координатах a — e можно сделать вывод о том, какая из групп астероидов может являться источником кометных ядер. Однако какая группа является главным источником — сказать трудно. Как отмечено выше, на сегодняшний день по известным физическим характеристикам астероидов трудно отдать предпочтение какой-либо из групп. Поэтому весьма важным аргументом в решении этого вопроса может служить количество тел в каждой из групп, т. е. потенциальных ядер КСЮ.

При оценке количества тел в каждой группе нужно отбирать орбиты с эксцентриситетами в диапазоне, близком к диапазону эксцентриситетов соседних орбит КСЮ. Исходя из распределения орбит в координатах a — e (рис. 1), можно принять, что для первой группы (АГП) нужно рассматривать орбиты с $e > 0.35$, для второй (группа Гильды) — с $e > 0.20$, для третьей (Троянцы) — с $e < 0.30$. Кроме того, следует отбирать тела с размерами $D < 1$ км, т. е. с абсолютными звездными величинами $H < 18^m$.

Количество астероидов первой группы с отмеченными значениями H и e (N_1) составило 420, группы Гильда (N_2) — около 1800, Троянцы (N_3) — около 5200. Если судить по количеству тел в разных груп-



пах, то наименее перспективно, как источник ядер КСЮ, выглядят астероиды внешнего края ГПА. Понятно, что приведенные цифры представляют количества открытых тел, а не реально существующих.

На потенциальную возможность каждой из групп быть источником ядер КСЮ указывают количества реально существующих тел. Для оценки таких количеств можно использовать следующий подход. Обычно для оценки размеров (диаметров) астероидов D используются выражения, связывающие абсолютные величины H и геометрические альbedo тел p_v . В частности, размеры астероидов в каталоге IRAS [11] вычислялись по формуле

$$2\lg D \text{ (км)} = 6.247 - 0.4H - \lg p_v. \quad (1)$$

В каталоге MPC для каждого астероида приведены значения H , но альbedo известно лишь для немногих тел. В нашем случае для приблизительной оценки можно ограничиться средними значениями альbedo. Если воспользоваться данными каталога IRAS, то для наших трех групп астероидов получим такие средние значения альbedo: группа 1 (около 400 тел), $p_v = 0.075$, группа Гильды (44 тела), $p_v = 0.048$, Троянцы (70 тел), $p_v = 0.056$. По данным исследования спектров астероидов в ближнем инфракрасном диапазоне [6] среднее значение p_v для Троянцев равно 0.053. Согласно результатам исследований по программе WISE [7] среднее значение альbedo астероидов группы Гильды (более 1000 тел) составляет 0.055. Учитывая приведенные данные, можно принять следующие средние значения альbedo: группа 1 — 0.075, группа 2 — 0.050, группа 3 — 0.055.

Само выражение (1) можно переписать в виде

$$D \text{ (км)} = 10^{0.2(H_1 - H)}, \quad (2)$$

где H_1 — коэффициент, зависящий от альbedo и численно равный абсолютной звездной величине астероида с размером $D = 1$ км. Для первой группы $H_1 = 18.43^m$, для второй группы $H_1 = 18.87^m$, для третьей группы $H_1 = 18.77^m$.

Для оценки количества астероидов обычно используют степенной закон распределения по размерам:

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

где dN — количество тел с размерами, близкими к D в интервале dD , k и p — численные коэффициенты. После интегрирования (3) с учетом (2) можно получить линейную зависимость $\lg N(H)$:

$$\lg N = a_1 H + a_0, \quad (4)$$

где N — количество реально существующих тел с абсолютными звездными величинами, не превышающими H , a_1 и a_0 — численные коэффициенты, зависящие от k и p .

Понятно, что для открытых астероидов зависимость $\lg N(H)$ будет иметь ход, близкий к линейному лишь на том участке значений H , на котором открыты практически все существующие тела. При больших значениях H данная зависимость будет наклоняться к оси H . Такие зависимости для трех групп астероидов приведены на рис. 3. Точками

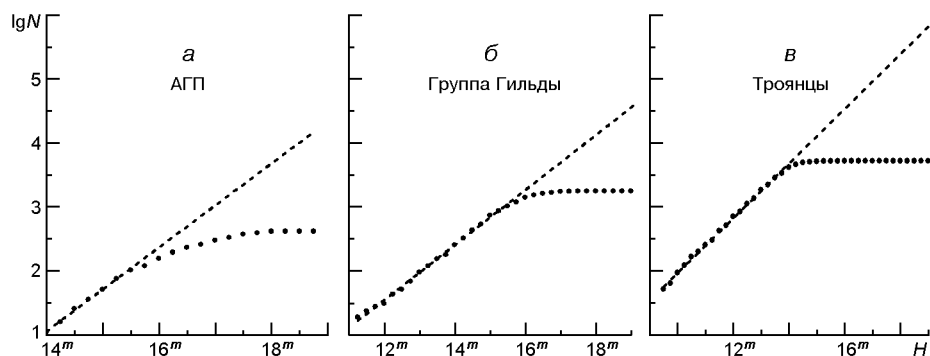


Рис. 3. Зависимости $\lg N(H)$ для трех групп астероидов: точки — открытые тела, штрихи — реально существующие (теоретические)

обозначены наблюдаемые зависимости для открытых тел, пунктиром — теоретические зависимости для всех тел, которые получены путем линейной аппроксимации наблюдаемых зависимостей на начальных участках.

На основании рис. 3 можно предположить, что в группе 1 открыты почти все существующие тела с $H < 15.50^m$ ($D > 4$ км), в группе 2 — с $H < 15.25^m$ ($D > 5.3$ км), в группе 3 — с $H < 13.50^m$ ($D > 11.3$ км). Наличие начальных квазилинейных участков на наблюдательных зависимостях косвенно подтверждает правомерность применения степенного распределения по размерам для этих групп тел.

Количество N_i реально существующих тел в группах с размерами $D > 1$ км можно приблизительно оценить из теоретических зависимостей $\lg N(H)$. В первой группе $N_i \approx 8000$, во второй группе $N_i \approx 30000$, в третьей группе $N_i \approx 500000$. Количество Троянцев больше чем на порядок превышает количество астероидов группы Гильды и почти на два порядка — количество астероидов внешнего края главного пояса. Вполне возможно, что в приведенных оценках количеств тел в группах есть определенные ошибки. Все же качественно эти оценки верны. Ведь и в каталоге Троянцев наибольшее количество. Кроме того, эти тела имеют более низкие альбедо, чем АГП, и расположены на максимальных расстояниях от Солнца и от Земли по сравнению с другими группами. Поэтому относительное количество еще не открытых Троянцев должно быть наибольшим. Следовательно, главным источником ядер КСЮ с наибольшей вероятностью можно считать Троянцев, с наименьшей вероятностью — астероидов внешнего края главного пояса.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОРБИТ ПО УГЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТАМ

Кометы семейства Юпитера имеют характерные распределения по угловым элементам орбит (наклону i , аргументу перигелия и долготе перигелия). Сравнение этих распределений с соответствующими

распределениями астероидов в группах также может помочь в поисках главного источника ядер КСЮ.

Распределения по наклонам орбит приведены на рис. 4. Можно видеть, что распределение $N(i)$ Троянцев ближе всего к распределению КСЮ. Распределение тел группы Гильды несколько отличается, но главный максимум совпадает с максимумом распределения КСЮ. Что касается АГП, то их распределение заметно отличается от распределения КСЮ.

При сравнении распределений $N(i)$ следует учитывать то, что средние значения эксцентриситетов орбит трех групп астероидов заметно отличаются. Кроме того, изменения элементов e и i в процессе эволюции обычно происходит в противофазе: минимальные значения e соответствуют максимальным значениям i и наоборот. Для орбит с большими эксцентриситетами ($e_{\max} > 0.7$) диапазон изменения наклонов составляет десятки градусов. Для меньших эксцентриситетов ($e_{\max} < 0.6$) диапазоны изменения i могут быть относительно небольшими (до 10°).

Средние значения эксцентриситетов орбит астероидов первой группы приблизительно равны среднему значению e КСЮ. Следовательно, распределение $N(i)$ АГП при их переходе в популяцию КСЮ не должно заметно измениться. Поэтому, сравнивая распределения a и b на рис. 3, можно заключить, что АГП не вносят решающего вклада в популяцию КСЮ.

Средние значения эксцентриситетов орбит тел группы Гильды несколько меньше эксцентриситетов орбит КСЮ. Поэтому при переходе

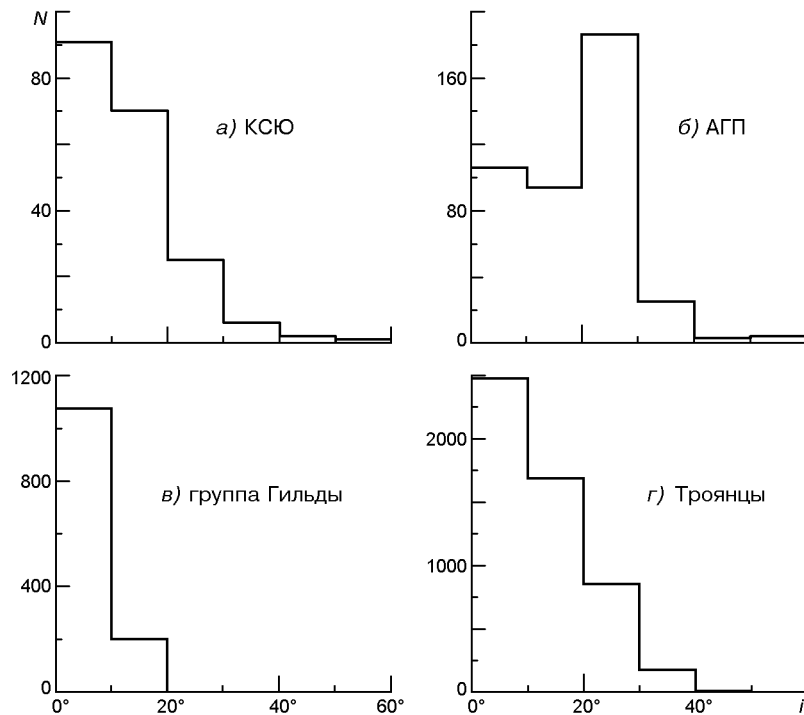


Рис. 4. Распределения числа комет семейства Юпитера и астероидов трех групп по наклону орбит

в популяцию КСЮ наклоны орбит тел группы Гильды в среднем должны еще немного уменьшиться. Следовательно, эти астероиды при таком переходе должны иметь небольшие наклоны орбит, а КСЮ с большими наклонами орбит, вероятно, образованы другими телами.

Средние значения эксцентриситетов орбит Троянцев еще меньше. Поэтому при переходе в КСЮ наклоны орбит этих тел должны в среднем в большей степени уменьшиться, чем в случае группы Гильды. Однако среди орбит Троянцев достаточно большое количество с большими наклонами. Поэтому этим телам, даже без учета их численности, проще других сформировать наблюдаемое распределение $N(i)$ КСЮ.

Распределение КСЮ по аргументу перигелия представлено на рис. 5. Здесь видны четкие максимумы вблизи значений $\omega = 0$ и $\omega = 180^\circ$. Это означает, что линии аписид большинства орбит КСЮ лежат вблизи плоскости эклиптики.

Подобное распределение можно объяснять по-разному. Во-первых, с точки зрения перехода КСЮ из внешних источников. Понятно, что такой переход осуществляется после сближений с Юпитером, которые всегда происходят вблизи плоскости эклиптики. При значительном уменьшении гелиоцентрической скорости кометы афелий новой орбиты будет близок к точке сближения, т. е. вблизи плоскости эклиптики. Из наших численных расчетов следует, что распределение $N(\omega)$ среднепериодических комет и Кентавров, перешедших в группу КСЮ [1], качественно близко к распределению на рис. 5.

Во-вторых, распределение $N(\omega)$ КСЮ очень просто объясняется эволюцией их нынешних орбит. Скорость изменения аргумента перигелия орбит с большими эксцентриситетами сильно зависит от самого значения ω . Особенно четко это проявляется для КСЮ, не испытывающих тесных сближений с Юпитером. На рис. 6 приведены зависимости $\dot{\omega}(t)$ для трех таких орбит. Видно, что скорости изменения аргумента перигелия при $\omega = 90^\circ, 270^\circ$ намного больше, чем соответствующие скорости при $\omega = 0^\circ, 180^\circ$. Следовательно, количество орбит с $\omega = 90^\circ, 270^\circ$ должно быть минимальным, а с $\omega = 0^\circ, 180^\circ$ — максимальным. Для комет, испытывающих тесные сближения с Юпитером, зависимости $\dot{\omega}(t)$ не такие четкие, но характер в целом сохраняется. Такое объяснение распределения $N(\omega)$ КСЮ предполагает, что эти кометы как небесно-механические объекты пребывают на данных орбитах не меньше чем средний период изменения ω , т. е. несколько тысяч лет.

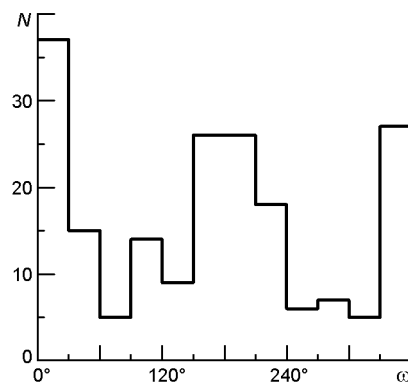


Рис. 5. Распределения числа комет семейства Юпитера по аргументу перигелия

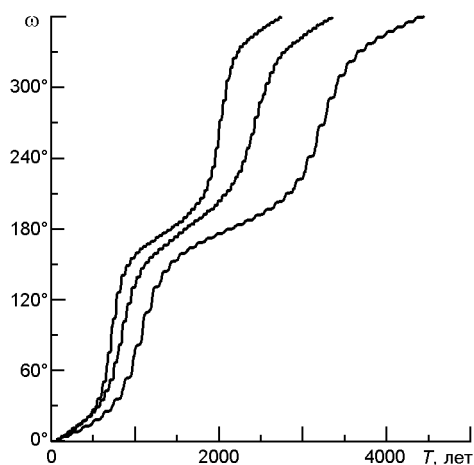


Рис. 6. Примеры изменения аргумента перигелия орбит комет семейства Юпитера в процессе эволюции

Зависимости $N(\omega)$ для астероидов группы Гильды и Троянцев качественно похожи на распределение КСЮ, но количественно (особенно для Троянцев) отличаются. Это происходит потому, что при небольших эксцентриситетах скорости изменений аргумента перигелия почти

не зависят от значения ω . Как отмечено выше, среднее значение эксцентриситетов орбит тел группы Гильды меньше, чем в КСЮ, а в Троянцев — еще меньше. При переходе в популяцию КСЮ и те, и другие приобретут распределение $N(\omega)$, характерное для комет. Таким образом, распределение $N(\omega)$ КСЮ не указывает непосредственно на источник ядер этих комет.

Теперь рассмотрим распределения по долготе перигелия (рис. 7). Все распределения качественно совпадают. На каждом видны четкий максимум в интервале $\omega = 0 \dots 60^\circ$ и четкий минимум в интервале $\omega = 180^\circ \dots 240^\circ$. Для орбит астероидов такие распределения (как и по аргументу перигелия) объясняются эволюцией орбит под действием Юпитера. Дело в том, что долгота перигелия орбиты Юпитера составляет около 15° , и Юпитер «выстраивает» долготы перигелиев орбит астероидов под это значение. Подобные распределения характерны для всех зон астероидов главного пояса.

Однако изменение долгот перигелиев орбит КСЮ происходит по иному сценарию. Здесь нет систематической зависимости скорости изменения долготы перигелия от самого значения ω . Поэтому причина такого распределения $N(\omega)$ для КСЮ не настолько очевидна, как в случае астероидов.

Определенную ясность в данный вопрос могут внести численные расчеты эволюции орбит КСЮ. На рис. 8, а представлены распределения $N(\omega)$ в разные моменты эволюции после начала интегрирования. Из рис. 7, а и рис. 8, а видно, что со временем различие между максимумом и минимумом в распределении уменьшается. Следовательно, распределение $N(\omega)$ КСЮ является реликтовым, т. е. КСЮ сохраняют значения долгот перигелиев тел, перешедших на орбиты комет. При этом до такого перехода в распределении $N(\omega)$ этих тел должно быть большее различие между максимумом и минимумом. Ведь со временем различие между максимумом и минимумом в распределении КСЮ уменьшается. Это указывает на тела группы Гильды и Троянцев как на более вероятный главный источник ядер КСЮ.

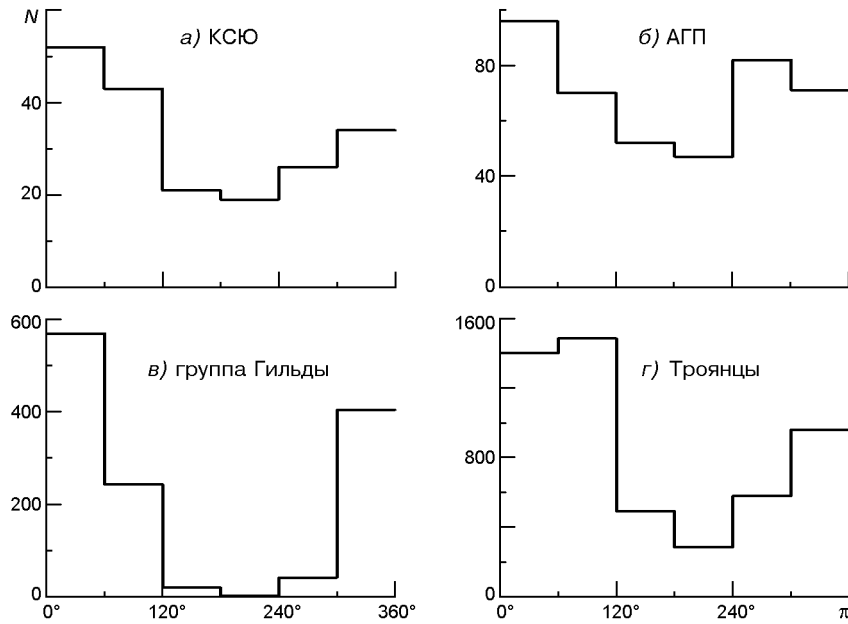


Рис. 7. Распределения числа комет семейства Юпитера и астероидов трех групп по долготе перигелия

Интересно отметить, что характерное распределение $N(\lambda)$ КСЮ может послужить еще одной проверкой вклада тел из внешних источников в популяцию этих комет. В процессе выполненных ранее [1] численных расчетов эволюции орбит СПК и Кентавров при каждом переходе какого-либо из этих тел в семейство Юпитера ($Q < 6.0$ а. е.) фиксировалось значение долготы перигелия орбиты данного тела. Распределение тел по этим значениям представлено на рис. 8, б. Видно, что данное распределение существенно отличается от распределения $N(\lambda)$ КСЮ на нынешнюю эпоху (рис. 7, а). Следовательно, распределение КСЮ по долготе перигелия подтверждает вывод о том, что внешние источники вносят относительно небольшой вклад в популяцию этих комет. С другой стороны, данное распределение указывает на тела группы Гильды и Троянцев как на более вероятный главный источник ядер КСЮ.

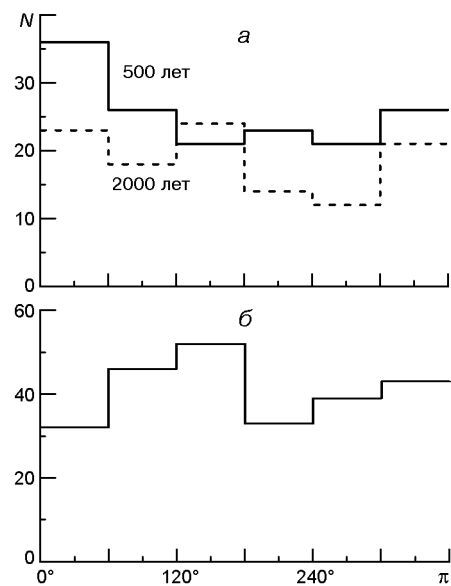


Рис. 8. Распределения тел комет семейства Юпитера значениям λ : а — КСЮ в разные периоды эволюции, б — КСЮ, перешедших из внешних источников

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенный выше анализ распределений орбит КСЮ и астероидов трех отобранных групп показывает не только возможность, но и механизм перехода астероидов на орбиты, характерные для данных комет. Характер эволюции орбит в координатах $a - e$ обеспечивает выход на эксцентричные орбиты тел всех трех групп после выхода из соизмеримостей. После этого тела могут приближаться к Солнцу на расстояния меньше 1.5 а. е., что может приводить к превращению астероидов в кометы (при наличии в них летучих веществ на небольших глубинах). Последнее условие является единственным (полностью не доказанным, но имеющим под собой основание) предположением в приведенном механизме перехода астероидов в кометы.

Выполненные оценки количеств существующих тел с размерами $D > 1$ км для всех трех групп указывают на существенное преимущество в этом аспекте Троянцев. Анализ распределений КСЮ и астероидов по угловым элементам также указывает на популяцию Троянцев как на более вероятный главный источник ядер КСЮ. Отдельный интерес представляют распределения по долготе перигелия, которые являются дополнительным подтверждением сделанного ранее вывода [1] о том, что главный источник ядер КСЮ — это одна из групп астероидов, а не СПК и Кентавры.

В целом полученные здесь результаты подтверждают и дополняют выводы предыдущей работе [1] о пространственном расположении главного источника КСЮ, и указывают на группу Троянцев как на наиболее вероятный резервуар ядер этих комет. Вполне возможно, что определенный вклад в популяцию КСЮ вносят тела группы Гильды и астероиды внешнего края ГПА. Естественно, что должен быть и вклад СПК и Кентавров. Однако вклад Троянцев, по-видимому, является доминирующим.

Вполне возможно, что полученные результаты вызывают сомнения на фоне сложившегося мнения о преимущественном переходе комет из орбит с большими периодами на орбиты с меньшими периодами. Серьезным аргументом в пользу такой точки зрения являются различные значения средних плотностей астероидов и ядер КСЮ. Считается, что средние плотности ядер большинства комет составляют десятые доли от плотности воды, в то время как средние плотности С-астероидов (наиболее рыхлых) — около 2 г/см^3 .

Что касается плотности астероидов, то их значения можно определять относительно точными методами (при сближениях астероидов, по движению компонентов в двойных системах). Тем не менее, в плотностях астероидов имеются весьма заметные ошибки. В совсем свежей публикации [3] собраны данные об определении плотностей около 300 астероидов и 12 ядер комет. В работе использовано более 200 отдельных определений масс астероидов. По этим данным ошибки определения плотностей для отдельных С-астероидов главного пояса иногда превышают 100 %, а диапазон значений плотностей этих тел

лежит в пределах $0.8...14.0 \text{ г/см}^3$. Очевидно, что такой широкий диапазон обусловлен главным образом погрешностями определения плотностей, а не их реальными значениями.

Плотности ядер комет на сегодня определяются косвенными методами — по влиянию вылетевших с поверхности ядер веществ на изменение элементов орбит комет. Такие методы могут иметь еще большие ошибки, чем в случае астероидов. Ведь при этом нужно знать распределение вылетающего из ядра вещества одновременно по массам, по скоростям и по направлениям. Кроме этого, нужно учитывать ход изменения названных распределений в течение временного интервала, на котором проводится сравнение элементов орбиты. Современные оценки плотностей кометных ядер приводятся с широким диапазоном погрешностей. По данным работы [3] средняя плотность ядра кометы 2/P составляет 1.67 г/см^3 при погрешности около 80 %, ядра кометы 45/P — 1.26 г/см^3 при погрешности около 200 %, ядра кометы 67P/Чурюмова — Герасименко — 0.43 г/см^3 при погрешности около 90 %.

В частности, согласно [9] безопасность посадки спускаемого аппарата «Philae» космической миссии Розетта на ядро кометы 67P/Чурюмова — Герасименко в 2014 г. весьма чувствительна к средней плотности ядра кометы. При плотности до 0.35 г/см^3 посадка должна быть безопасной. Но уже при плотности 0.5 г/см^3 и больше посадка модуля на поверхность ядра будет под угрозой. Все же именно миссия «Розетта» имеет шанс однозначно решить проблему происхождения КСЮ. Ведь уже при подлете к ядру кометы и выходе аппарата на кометоцентрическую орбиту будет довольно точно определены масса и средняя плотность ядра. Если плотность окажется гораздо больше, чем предполагается, то это будет указывать на астероидный источник происхождения данного ядра. Вместе с тем большая плотность ядра создаст проблемы при посадке на ядро спускаемого аппарата «Philae». Изложенные в данной работе аргументы говорят, что такую возможность не следует исключать.

В принципе относительно небольшая плотность ядер не обязательно противоречит их астероидному происхождению. Ведь кометными ядрами могут становиться только мелкие астероиды, т. е. некоторые из осколков дробления крупных тел, и только те из них, в которых есть заметная часть летучих веществ. Такие астероиды обладают меньшей средней плотностью, чем другие астероиды; их летучие вещества испаряются не со всей поверхности ядра, а с некоторых его частей, образуя кратеры. После испарения видимые размеры ядра не изменяются, а масса — уменьшается. Ядро становится более пористым и менее плотным в среднем. Но все же плотность кометных ядер астероидного происхождения должна быть заметно выше 0.5 г/см^3 .

Кроме определенной аппаратом «Розетта» плотности ядра кометы 67P/Чурюмова — Герасименко), более детальная информация ожидается от результатов исследования спускаемым модулем «Philae». Эти исследования должны однозначно ответить на вопрос об источнике ядер КСЮ. Однако для успешной посадки модуля на ядро кометы сле-

дует заранее учитывать возможность его гораздо большей средней плотности, чем предполагается.

ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ распределений КСЮ и астероидов по долготе перигелия подтверждает вывод работы [1] о пространственном расположении главного источника КСЮ на расстоянии от Солнца не больше 6 а. е.

2. Характер эволюции орбит КСЮ в координатах $a - e$ показывает не только возможность, но и механизм перехода астероидов трех отобранных групп (астероидов внешнего края главного пояса, группы Гильды и Троянцев) на орбиты, характерные для данных комет.

3. Анализ распределения астероидов по элементам орбит и оценка их численности в группах указывают на группу Троянцев как на наиболее вероятный главный резервуар ядер КСЮ.

1. *Казанцев А. М.* Поиск источника ядер короткопериодических комет. Направление пространственной миграции комет // Кинематика и физика небес. тел.—2012.—**28**, № 6.—С. 345—359.
2. *Burchell M. J., Kearsley A. T.* Short-period Jupiter family comets after stardust // Planet. and Space Sci.—2009.—**57**, N 10.—P. 1146—1161.
3. *Carry B.* Density of asteroids // Planet. and Space Sci.—2012.—**73**, N 1.—P. 98—118.—(2012.arXiv:1203.4336).
4. *Crovisier J.* Cometary diversity and cometary families // Proceedings of the XVIIIemes Rencontres de Blois: Planetary Science: Challenges and Discoveries, 28th May — 2nd June 2006, Blois, France.—Blois, 2007.—(ArXiv:arxiv:/astro-ph/0703785v1).
5. *di Sisto R. P., Brunini A., Dirani L. D., Orellana R. B.* Hilda asteroids among Jupiter family comets // Icarus.—2005.—**174**, N 1.—P. 81—89.
6. *Emery J. P., Burr D. M., Cruikshank D. P.* Near-infrared spectroscopy of Trojan asteroids: evidence for two compositional groups // Astron. J.—2011.—**141**, N 1.—id.25.
7. *Grav T., Mainzer A. K., Bauer J., et al.* WISE/NEOWISE observations of the hilda population: preliminary results // Astrophys. J.—2012.—**744**, N 2.—id.197.
8. *Grav T., Mainzer A. K., Bauer J. M., et al.* WISE/NEOWISE observations of the jovian trojan population: taxonomy // Astrophys. J.—2012.—**759**, N 1.—id. 49.—(doi:10.1088/0004-637X/759/1/49).
9. *Lamy P. L.* Spitzer Space Telescope observations of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. and Astrophys.—2008.—**489**, N 2.—P. 777—785.
10. *Nakamura T., Noguchi T., Tsuchiyama A., et al.* Chondrulelike objects in short-period comet 81P/Wild 2 // Science.—2008.—**321**, N 5896.—P. 1664—1667.
11. *Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D.* The supplemental IRAS minor planet survey // Astron. J.—2002.—**123**.—P. 1056—1085.

Статья поступила в редакцию 11.04.13