



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Ф. Заусаев, А. А. Заусаев, О природе происхождения короткопериодических комет. к вопросу об эволюции короткопериодических комет, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 2(), 145–150

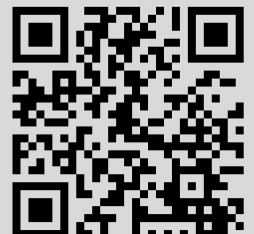
DOI: 10.14498/vsgtu544

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.81

16 марта 2025 г., 05:40:30



Небесная механика

УДК 523.642

А. Ф. Заусаев, А. А. Заусаев

О ПРИРОДЕ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ. К ВОПРОСУ ОБ ЭВОЛЮЦИИ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

Рассмотрены основные гипотезы происхождения короткопериодических комет. На основании проведённых исследований делается вывод, что основными источниками короткопериодических комет являются: главный пояс астероидов; реликтовые астероидные пояса, расположенные между планетами-гигантами, и пояс Уиппла–Койпера.

Проблема происхождения комет — одна из нерешённых проблем кометной астрономии. Кометы как короткопериодические, так и долгопериодические, наряду с астероидами и метеорными телами, относятся к группе малых тел Солнечной системы. Орбиты астероидов, комет и метеорных тел принадлежат одной и той же области межпланетного пространства, но имеют различные области в фазовом пространстве скоростей. Орбитальные характеристики этих тел можно описать тремя параметрами: большой полуосью a , эксцентриситетом e и наклоном i , где a — мера среднего расстояния от Солнца, e — мера радиальных колебаний и i — мера осевых колебаний.

Х. Альвен [1], классифицируя малые тела по значениям a , e , i , выделяет шесть семейств. Отметим из них три: 1) главный пояс астероидов: $e < \frac{1}{3}$, $i < 20^\circ$, $2,1 \text{ а. е.} < a < 3,5 \text{ а. е.}$; 2) короткопериодические кометы и метеорные тела (включая астероиды группы Аполлона, Амура, Атона): $\frac{1}{3} < e < 0,95$, $i < 30^\circ$, $a < 15 \text{ а. е.}$; 3) долгопериодические кометы и метеорные тела: $e > 0,95$, i — случайное, $a > 15 \text{ а. е.}$

Главный пояс астероидов, короткопериодические и долгопериодические кометы занимают различные места в пространстве скоростей, поэтому природа их происхождения считается различной.

Космогонисты школы О. Ю. Шмидта — Б. Ю. Левин, В. С. Сафронов [2] — выявили, что в процессе роста планет-гигантов под действием гравитационных возмущений происходил массовый выброс малых тел за пределы Солнечной системы. Опираясь на эту идею, голландский учёный Я. Оорт обосновал существование в окрестности Солнечной системы гигантского облака кометных ядер, простирающегося на расстояние до 1 парсека. Под действием звёздных возмущений орбиты некоторых ядер изменяются и по вытянутым траекториям возвращаются в Солнечную систему, обнаруживая себя как долгопериодические кометы.

По оценкам В. В. Радзиевского, М. М. Дагаева [3], Ф. А. Цицина [4], радиус роя реликтовых кометных тел существенно больше среднего межзвёздного расстояния (примерно 2 парсека), но явно меньше 100 световых лет. По их мнению, этот рой и есть источник долгопериодических комет. Данная модель имеет строгое математическое и логическое обоснование и не имеет серьёзных возражений у большинства исследователей, занимающихся вопросами происхождения и эволюции долгопериодических комет.

Однако относительно природы происхождения короткопериодических комет, существует ряд взаимно исключаящих гипотез, каждая из которых не выдерживает строгой статистической проверки.

Одной из таких гипотез является теория захвата планетами-гигантами на короткопериодические орбиты долгопериодических комет. Сторонником этой гипотезы является Э. Эверхарт. Объяснение с помощью данной гипотезы образования короткопериодических комет противоречит статистическим данным. Для того чтобы получить наблюдаемое количество короткопериодических комет с помощью теории захвата из долгопериодических, число последних должно быть на несколько порядков больше открытых в настоящее время.

Эруптивная гипотеза образования комет путем выброса с планет-гигантов или из их спутников, впервые предложенная Ж. Л. Лагранжем и развитая позже С. К. Всехватским [5], также оказалась несостоятельной вследствие возникших трудностей при объяснении распределения

элементов орбит как короткопериодических, так и долгопериодических комет.

Значительные успехи в решении проблемы происхождения короткопериодических комет связаны с предположением Е. И. Казимирчак—Полонской [6] существования поясов реликтовых кометных тел в зонах между планетами-гигантами. Опираясь на полученные результаты Е. И. Казимирчак—Полонской, Ф. А. Цицин [4] предлагает следующую модель образования короткопериодических комет: «Оставшиеся (вопреки господствующему предрассудку) в планетной зоне (в поясах между планетами-гигантами и в поясе Уиппла—Койпера) реликтовые планетаземали (кометные тела) — это другая, динамически стабильная подсистема реликтового резервуара кометных тел Солнечной системы. Из неё появляются периодические кометы. Как правило, это инициируется соударением кометных тел в реликтовом поясе, что, кстати, в той или иной мере разрушает выросшую за историю данного тела тугоплавкую и теплоизолирующую “корку”, “омолаживая” объект и реанимируя его как потенциальную комету».

Исследование происхождения короткопериодических комет, проведённые В. В. Емельяненко, также подтверждают, что кометы семейства Юпитера являются транснептуновыми объектами [7].

Таким образом, рассмотрев различные гипотезы об образовании комет, можно утверждать, что наиболее обоснованной из них является гипотеза о существовании двух роев реликтовых комет. Долгопериодические кометы приходят к нам из роя, расположенного в галактической окрестности Солнца. Источником короткопериодических комет являются реликтовые кометы, находящиеся в поясах между планетами-гигантами и в поясе Уиппла—Койпера.

Возникают естественные вопросы: существуют ли отдельные группы из числа короткопериодических комет, обладающие родственной связью, и какова роль главного пояса астероидов в образовании короткопериодических комет?

Ответить на эти вопросы можно с помощью исследования эволюции орбит короткопериодических комет. В небесной механике исследование эволюции орбит комет считается одной из самых трудных задач, разрешимой только посредством трудоёмкого численного интегрирования.

Впервые точные расчёты орбитальной эволюции на длительных интервалах времени были произведены в 60-х годах прошлого столетия Е. И. Казимирчак—Полонской [8], Б. Г. Марсденом, Н. А. Беляевым [9], Э. Эверхартом. Путём объединения разрозненной информации был создан ряд каталогов кометных орбит.

В настоящее время наиболее полным и информативным кометным каталогом является каталог Марсдена [10]. Он содержит элементы орбит всех известных как периодических, так и непериодических комет на моменты прохождения их через перигелий.

Из известных каталогов короткопериодических комет следует также выделить каталоги Беляева, Кресака и др. (1986); Хасегавы (1968); Карузи (1985); Карузи, Кресака и др. (2000).

В связи с тем, что список открытых комет растёт, а также появляются новые наблюдения известных комет, возникает потребность в постоянном обновлении каталогов кометных орбит.

При исследовании эволюции орбит небесных объектов точность полученных результатов зависит от ряда факторов, основными из которых являются: учёт физических моделей действующих сил; точность аппроксимирующей формулы численного метода интегрирования; устойчивость как самой задачи, так и численного метода.

Большинство предыдущих кометных каталогов были составлены на основе решения стандартной задачи n тел, а расхождения с реальными наблюдениями устранялись путём искусственного введения так называемых негравитационных эффектов, не имеющих чётких физических обоснований.

При создании нами каталога орбитальной эволюции короткопериодических комет с 1900 по 2100 гг. [11] за основу были взяты уравнения движения с учётом гравитационных и релятивистских эффектов, используемых небесными механиками Ньюхаллом, Стэндишем и Вильямсом [12] для создания банка данных координат больших планет и Луны — DE 405. Численное интегрирование уравнений движения больших планет, Луны, Солнца и комет проводилось модифицированным методом Эверхарта 27 порядка [13, 14]. Данные каталога об орбитальной эволюции и тесных сближениях короткопериодических комет с большими планетами являются полезными для выявления общих закономерностей развития и происхождения комет.

При сближении кометы с большой планетой элементы её орбиты могут существенно измениться, поэтому возникает необходимость отождествления комет с различными системами элементов. Необходимым условием тождественности является равенство значений постоянной

Тиссерана T для различных систем элементов. Аналитическое выражение критерия Тиссерана вытекает из интеграла Якоби и имеет следующий вид [15]:

$$T_p = \frac{a_p}{a} + 2 \left(\frac{a}{a_p} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \cos i. \quad (1)$$

По отношению к Юпитеру величину T можно вычислить по формуле [16]

$$T = a^{-1} + 0,16860\sqrt{p} \cos i, \quad (2)$$

где $T = \frac{T_p}{a_p}$, a_p — большая полуось орбиты Юпитера, a — большая полуось орбиты кометы, p — значение параметра орбиты кометы, i — наклонение кометной орбиты, e — эксцентриситет орбиты кометы.

Проведённое нами исследование эволюции орбит короткопериодических комет [11] показало, что из 164 комет, 99 — имеют сближения с Юпитером на расстоянии менее 0,5 а. е. Это указывает на то, что основной вклад в эволюцию орбит короткопериодических комет оказывает Юпитер, поэтому постоянная Тиссерана вычислялась по формуле (2).

Постоянная Тиссерана может быть использована при решении вопроса о тождественности вновь открытой периодической кометы с кометой, наблюдавшейся ранее. Однако данный вопрос не всегда может быть решён путём простого сравнения элементов орбит, так как при прохождении кометы вблизи одной из больших планет может произойти существенное изменение элементов орбиты.

Решить вопрос о тождественности можно двумя способами: а) путём вычисления возмущений одной из комет за промежутки времени, отделяющие её появления от появления другой кометы; б) путём сравнения значений постоянной Тиссерана. Достаточная близость постоянных Тиссерана двух комет является необходимым, но, очевидно, недостаточным условием тождественности этих комет. Сочетание обоих этих способов при исследовании тождественности комет приводит к более надёжному получению правильного вывода.

Основываясь на свойстве критерия Тиссерана, устанавливающего тождественность комет, нами предпринята попытка классификации короткопериодических комет по величине данного критерия. На рис. 1 показана зависимость распределения численности комет от величины постоянной Тиссерана. Данные приведены для 164 комет из каталога орбитальной эволюции [11].

Под действием планетных возмущений величины критерия Тиссерана на моменты времени с 1900 по 2100 гг. для каждой из комет отличаются незначительно. Для комет, имеющих тесные сближения с Юпитером, постоянные различаются друг от друга не более чем на 0,01, а для комет с умеренными сближениями — не более чем на 0,001.

Как видно из рис. 1, для большинства короткопериодических комет, значения постоянных Тиссерана T заключены в интервале от 0,5 до 0,6, в то время как общий интервал величин критерия Тиссерана составляет $(-0,15; 0,65)$.

Близость постоянных Тиссерана у различных комет является необходимым условием их генетической связи. Следовательно, на основании данных, приведённых на рис. 1, можно сделать вывод, что короткопериодические кометы, постоянные Тиссерана которых заключены в интервале от 0,5 до 0,6, имеют одинаковую природу происхождения. Количество таких объектов более 120. Природа происхождения комет с обратным движением, а также тех комет, орбиты которых находятся за пределами Нептуна, должна быть другой.

Рассмотрим теперь возможность образования короткопериодических комет в главном поясе астероидов. Связь короткопериодических комет с астероидами в главном поясе до недавнего времени встречала серьёзные возражения вследствие того, что не было известно ни одной

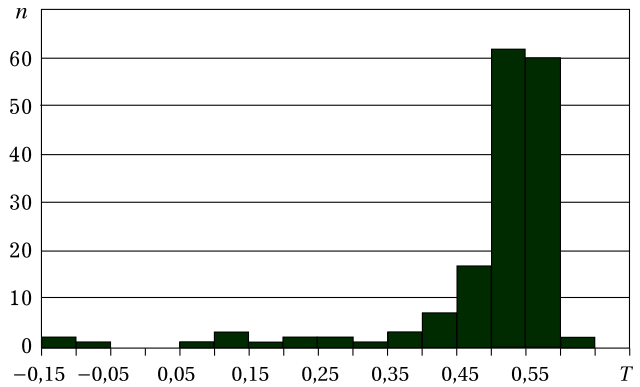


Рис. 1. Число короткопериодических комет (n) как функция величины постоянных Тиссерана (T)

кометы, относящейся к первому семейству. Из анализа элементов орбит 164 короткопериодических комет, отнесённых к эпохе 2000 г., следует, что комета 133 P/Elst-Pizarro, у которой $a = 3,16$ а. е., $e = 0,17$, $i = 1,4^\circ$, принадлежит первому семейству.

Орбита кометы не имеет тесных сближений с большими планетами, поэтому на интервале времени 200 лет элементы ее орбиты не претерпевают существенных изменений. Большая полуось изменяется в пределах $3,15$ а. е. $< a < 3,19$ а. е., эксцентриситет: $0,14 < e < 0,18$, наклонение: $1,3^\circ < i < 1,5^\circ$.

Имеются еще, по крайней мере, 12 комет, элементы орбит которых незначительно отличаются от элементов, характеризующих первую группу. Это кометы 48 P/Johnson, 65 P/Gunn, 77 P/Longmore, 86 P/Wild 3, 87 P/Bus, 91 P/Russell 3, 94 P/Russell 4, 110 P/Hartley 3, 127 P/Holt-Olmstead, 129 P/Shoemaker-Levy 3, 131 P/Mueller 2, 147 P/Kushida-Muramatsu. Четыре объекта (48, 94, 110, 127) [11] не имеют тесных сближений с Юпитером на исследуемом интервале времени (1900–2100 гг.) и, следовательно, могут продолжительное время оставаться на относительно стационарных орбитах.

На рис. 2 показана зависимость числа короткопериодических комет от величины большой полуоси орбиты. Наибольшее число комет — 128 имеют большие полуоси от 2,5 а. е. до 5 а. е., т. е. принадлежат интервалу, в котором расположен главный пояс астероидов, и лишь 36 находятся за пределами этого промежутка.

Вследствие того, что имеет место равенство $h = -a^{-1}$, где h носит название постоянной энергии, большинство постоянных энергии короткопериодических комет сопоставимы по величине с постоянными энергиями астероидов, принадлежащих главному поясу.

На рис. 3 показана зависимость числа короткопериодических комет от величины эксцентриситета. Известно, что планетные возмущения оказывают на изменение эксцентриситета большее влияние, чем на изменение большой полуоси, что подтверждается отсутствием резко выраженных максимумов численности при определенных значениях эксцентриситетов (от 0,5 до 0,6). В эту область (т. е. $0,5 < e < 0,6$) входят около 1/3 всех короткопериодических комет.

На рис. 4, 5 представлена зависимость числа короткопериодических комет от величины наклонения и афелийного расстояния. Как видно из рис. 4, около 75% всех короткопериодических комет имеют наклонения менее 20 градусов, т. е. относятся к первому семейству.

Из анализа распределения элементов орбит следует, что по величине большой полуоси и наклонению 75% всех короткопериодических комет принадлежат первому семейству, остальные 25% — второму.

Обратный результат получается при классификации короткопериодических комет по значениям эксцентриситетов и афелийным расстояниям, т. е. около 75% комет относятся ко второму семейству и лишь 25% — к первому.

Как видно из рис. 4, орбиты комет не являются устойчивыми, так как на основании теорем Лапласа и Арнольда [17], эксцентриситеты и наклонения орбит должны быть достаточно малы. Для короткопериодических кометных орбит эти условия не выполняются.

Разрешима ли задача о происхождении короткопериодических комет, и какие подходы могут быть использованы при её решении?

Одним из широко распространённых методов решения данной задачи является разработка и реализация математических моделей, основанных на изучении фиктивных объектов. Вторым подходом для решения этой задачи может служить исследование эволюции орбит реальных

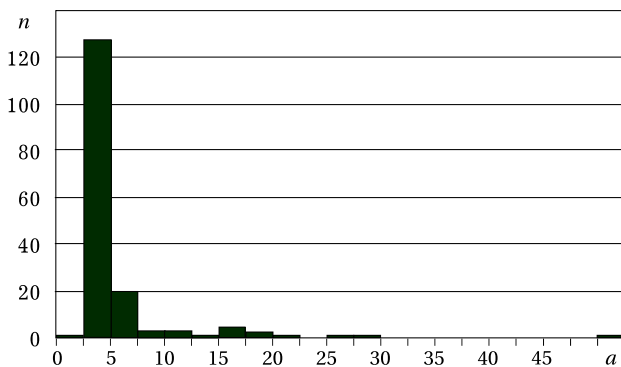


Рис. 2. Число короткопериодических комет (n) как функция величины большой полуоси орбиты (a)

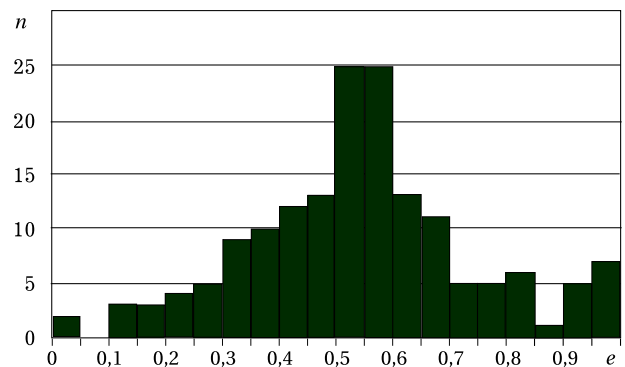


Рис. 3. Число короткопериодических комет (n) как функция величины эксцентриситета (e)

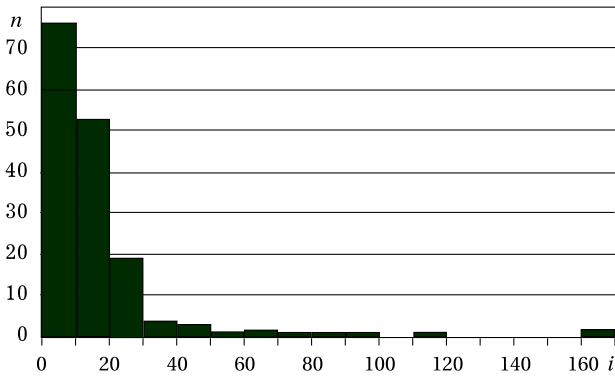


Рис. 4. Число короткопериодических комет (n) как функция величины наклонения (i)

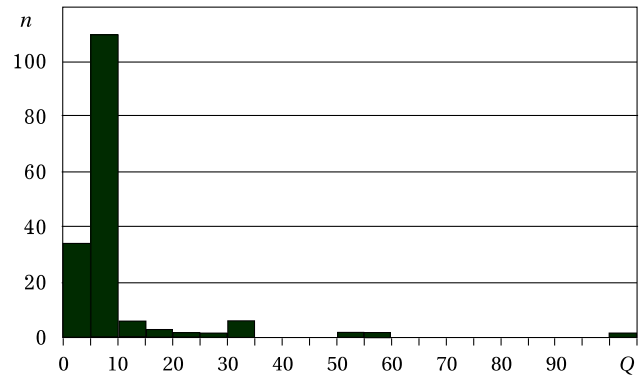


Рис. 5. Число короткопериодических комет (n) как функция величины афелийного расстояния (Q)

объектов с учётом основных действующих сил.

Как в первом, так и во втором случаях основной трудностью является ограниченность интервала исследования. При численном моделировании движения небесных тел из-за быстрого накопления ошибок округления не представляется возможным получить результаты с высокой степенью точности на интервале времени, сравнимом с возрастом Солнечной системы. Однако при исследовании реальных объектов некоторые закономерности орбитальной эволюции комет могут быть выявлены.

На основании результатов расчётов, проведённых авторами при разработке каталога орбитальной эволюции короткопериодических комет [11], показано, что из 164 комет у 14-ти из-за тесных сближений с Юпитером происходит существенное изменение как формы, так и размеров орбит.

Так, например, комета 59 P/Kearns-Kwee до сближения с Юпитером 13 ноября 1961 г. двигалась по орбите с элементами: $a = 18,05$ а. е.; $e = 0,75$; $i = 1,81^\circ$, а после сближения элементы орбиты приняли следующие значения: $a = 4,32$ а. е.; $e = 0,49$; $i = 8,99^\circ$.

У кометы 129 P/Shomaker-Levy 3 после тесного сближения с Юпитером 7 августа 1909 г. большая полуось изменилась с 7,38 а. е. до 3,75 а. е., эксцентриситет с 0,26 до 0,24 и наклонение с $3,47^\circ$ до $5,02^\circ$, а в 2049 г. в результате тесного сближения с Юпитером на расстоянии 0,16 а. е. вновь произойдёт значительное изменение элементов орбиты, большая полуось возрастёт с 4,28 а. е. до 7,12 а. е., эксцентриситет с 0,08 до 0,24 и наклонение с $3,45^\circ$ до $8,21^\circ$.

Таким образом, в результате тесных сближений кометы с Юпитером, может произойти как захват её во внутреннюю область Юпитера, так и выброс её за пределы орбит Сатурна, Урана и Нептуна.

Проведённые исследования эволюции орбит короткопериодических комет показали, что умеренные и тесные сближения комет с Юпитером — есть закономерное явление, которое реализуется со временем для каждой кометы семейства Юпитера [18].

Образование комет семейства Юпитера можно описать следующей упрощённой схемой. При столкновении в поясе астероидов, в реликтовых поясах между планетами-гигантами и в поясе Уиппла-Койпера образуются кометы с неустойчивыми движениями. Под действием планетных возмущений, с течением времени, эти кометы становятся членами семейств планет-гигантов. Путём решения модельных задач это утверждение может быть обосновано. Сложность заключается в доказательстве существования зон устойчивости между орбитами планет-гигантов. Решение этой задачи связано непосредственно с решением проблемы устойчивости Солнечной системы.

Таким образом, на основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы: строгого решения задачи об определении источников короткопериодических комет не может быть получено (без определённых допущений). Это связано с проблемой устойчивости Солнечной системы. Однако при выполнении определённых условий эти источники могут быть найдены.

Полагая, что наряду с главным поясом астероидов существуют реликтовые кометы в зонах устойчивости движения малых тел Солнечной системы между планетами-гигантами и, опираясь на результаты исследования эволюции орбит конкретных короткопериодических комет [8], можно сделать следующее заключение. Основными источниками короткопериодических комет

являются: а) главный пояс астероидов (его внешняя область); б) реликтовые кометы в устойчивых зонах между планетами-гигантами; в) пояс Уиппла—Койпера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП. 2.1.1.1689)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альвен, Х. Эволюция Солнечной системы [Текст] / Х. Альвен, Г. Аррениус. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
2. Сафронов, В. С. О росте планет в протопланетном облаке [Текст] / В. С. Сафронов // Астрон. ж. — 1954. — Т. 31, Вып. 3. — С. 499–510.
3. Радзиевский, В. В. Некоторые эффекты и проблемы взаимодействия звёзд с межзвёздной средой [Текст] / В. В. Радзиевский, М. М. Дагаев // Астрон. ж. — 1969. — Т. 46, № 1. — С. 56–65.
4. Цицин, Ф. А. Происхождение комет: новый взгляд на старую проблему [Текст] Ф. А. Цицин // Вселенная и мы. — 2001. — № 4. — С. 21–29.
5. Всехсвятский С. К. Природа и происхождение комет и метеорного вещества. — М.: Просвещение, 1967.
6. Казимирчак—Полонская, Е. И. Захват комет Юпитером и некоторые закономерности вековой эволюции кометных орбит [Текст] / Е. И. Казимирчак—Полонская / В сб.: Проблемы исследования Вселенной (Астрометрия и небесная механика). — М.—Л., 1978. — Т. 7. — С. 340–383.
7. Емельяненко, В. В. Происхождение короткопериодических комет: динамическая эволюция из внешней части Солнечной системы в околоземное пространство [Текст] / В. В. Емельяненко / В сб.: Околоземная астрономия—2003. — СПб.: ВВМ, 2003. — Т. 1. — С. 101–107.
8. Казимирчак—Полонская, Е. И. Эволюция орбит короткопериодических комет на интервале 1660–2060 гг. и роль внешних планет в этой эволюции [Текст] / Е. И. Казимирчак—Полонская // Астрон. ж. — 1967. — № 2. — С. 439–460.
9. Беляев, Н. А. Эволюция орбиты кометы Даниэля 1909 IV за 400 лет (1660–2060 гг.) [Текст] / Н. А. Беляев // Бюл. ИТА. — 1966. — Т. 10, № 10. — С. 696–710.
10. Marsden, B. Catalogue of Cometary Orbits [Text] / B. Marsden, G. V. Williams; 13th ed. — Central Bureau for Astronomical Telegrams and Minor Planet Center, 1999.
11. Заусаев, А. Ф. Каталог орбитальной эволюции короткопериодических комет с 1900 по 2100 гг. [Текст] / А. Ф. Заусаев, А. А. Заусаев. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 346 с. — ISBN 5–94275–204–4.
12. Newhall, X. X. DE 102: a numerically integrated ephemeris of the Moon and planets spanning forty-four centuries [Text] / X. X. Newhall, E. M. Standish, Jr. and J. G. Williams // Astron. Astrophys. — 1983. — No. 125. — P. 150–167.
13. Everhart, E. Implicit single methods for integrating orbits [Text] / E. Everhart // Celestial mechanics. — 1974. — No 10. — P. 35–55.
14. Заусаев, А. А. Математическое моделирование движения небесных тел на основе высокоточных разностных схем [Текст]: Автореф. дисс. . . канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / А. А. Заусаев; Сам. госуд. техн. ун-т. — Самара, 2005. — 20 с.
15. Каталог короткопериодических комет [Текст] / Н. А. Беляев, Л. Кресак, Э. М. Питтих, А. Н. Пушкарев. — Братислава, 1986. — 398 с.
16. Субботин, М. Ф. Введение в теоретическую астрономию [Текст] / М. Ф. Субботин. — М.: Наука, 1968. — 800 с.
17. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике [Текст] / В. К. Абалакин, Е. П. Аксенов, Е. А. Гребенников и др. — М.: Наука, 1976. — 862 с.
18. Казимирчак—Полонская, Е. И. Обзор исследований тесных сближений короткопериодических комет с Юпитером (1770–1960) [Текст] / Е. И. Казимирчак—Полонская // Тр. ИТА. — 1961. — № 7. — С. 19–190.