

Необычное проявление возмущения Лидова – Козаи в группе Гильды

© Т. А. Виноградова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Исследовано действие механизма Лидова – Козаи в области группы Гильды, астероиды которой движутся в соизмеримости средних движений 3:2 с Юпитером. Исследование производилось с помощью численного интегрирования уравнений движения реальных астероидов. При этом использовалась простейшая динамическая модель, в которой учитывались возмущения только от Юпитера, движущегося по фиксированной эллиптической орбите. После исключения классических вековых возмущений было исследовано влияние механизма Лидова – Козаи на элементы орбит. В результате обнаружено, что максимум эксцентриситета и соответственно минимум наклона орбиты наблюдаются не при обычных значениях аргумента перигелия $\omega = 90^\circ$ и 270° , а в точках $\omega = 0^\circ$, 180° . При значении же $\omega = 90^\circ$, 270° , наоборот, имеет место минимум эксцентриситета и максимум наклона. Обычный для возмущения Лидова – Козаи характер изменения наклона и эксцентриситета сохраняется только для астероидов, большая полуось орбиты которых либрирует с относительно большой амплитудой.

Ключевые слова: небесная механика, астероиды, вековые возмущения.

Контакты для связи: Виноградова Тамара Алексеевна (vta@iaaras.ru).

Статья поступила в редакцию 16.09.2020, принята к публикации 02.10.2020, опубликована 30.10.2020.

Для цитирования: Виноградова Т. А. Необычное проявление возмущения Лидова – Козаи в группе Гильды // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.54.3-10>

Unusual Lidov – Kozai Perturbation in the Hilda Group

T. A. Vinogradova

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The Lidov – Kozai mechanism was investigated in the region of the Hilda group. The asteroids in this region move in commensurability of the mean motions 3:2 with Jupiter. The study was carried out mainly by means of numerical integration of the equations of real asteroids motion. The simplest dynamic model was used with Jupiter as the only perturbing body moving in a fixed elliptical orbit. After eliminating the classical secular perturbations, it becomes possible to determine the influence of the Lidov – Kozai mechanism on the orbital elements. As a result, it was found that the maximum eccentricity, and, accordingly, the minimum inclination is observed when the argument of perihelion $\omega = 0^\circ$, 180° , whilst usually it takes place at $\omega = 90^\circ$, 270° . On the contrary, there is a minimum eccentricity and a maximum inclination at $\omega = 90^\circ$, 270° . The character of the elements change, which is typical for the Lidov – Kozai perturbation, is preserved for only asteroids with a large amplitude of the semi-major axis libration.

Keywords: celestial mechanics, asteroids, secular perturbations.

Contacts: Tamara A. Vinogradova (vta@iaaras.ru).

Received 16 September, 2020, accepted 2 October, 2020, published 30 October, 2020.

For citation: Vinogradova T. A. Unusual Lidov – Kozai perturbation in the Hilda group // Transactions of IAA RAS. 2020. Iss. 54. P. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.54.3-10>

Введение

Группа Гильды представляет собой популяцию астероидов, движущихся в области устойчивого резонанса 3:2 средних движений астероидов и Юпитера. Большая полуось орбит этих астероидов колеблется около значения 3.97 а.е. Резонанс накладывает сильный отпечаток на движение этих астероидов. Сложность движения астероидов

в резонансе может быть показана на примере знаменитого треугольника Гильды. На рис. 1 изображены эклиптические координаты (x, y) астероидов группы Гильды на момент времени 2019.11.13 (JD2458800.5). Кроме того, показаны координаты Юпитера на тот же момент времени, а также проекция на плоскость эклиптики его орбиты с точками либрации L3, L4, L5. Видно, что распределе-

ние этих астероидов в пространстве представляет собой почти равносторонний треугольник, вершины которого располагаются вблизи точек либрации. Треугольник вращается вместе с Юпитером, будучи обращенным к нему серединой одной из своих сторон. Астероиды движутся по своим эллиптическим орбитам значительно быстрее Юпитера, постоянно обгоняя его, но все вместе всегда сохраняют относительно него такую конфигурацию. Ещё одна особенность эволюции орбит астероидов в этой области — обратное движение перигелиев.

Под действием возмущений от больших планет эксцентриситеты и наклоны орбит астероидов испытывают периодические колебания. Наиболее значимыми являются вековые возмущения. Различают два вида вековых возмущений: классические вековые возмущения и возмущение Лидова – Козаи (ЛК). Классические вековые возмущения описывает вековая теория [1]. В результате действия этих возмущений эксцентриситеты совершают периодические колебания в зависимости от долготы перигелия, а наклоны орбит — аналогичные колебания в зависимости от долготы узла.

В случае больших наклонов или эксцентриситетов значительно большее влияние на элементы орбит оказывает возмущение ЛК. Это возмущение было впервые описано М. Лидовым в 1961 г. [2] для искусственных спутников Земли. Позднее Ё. Козаи [3] разработал аналитическую теорию для астероидов с большими наклонами орбит. В этих работах рассмотрено движение объекта с большим наклоном орбиты под действием возмущения со стороны внешнего тела при условии отсутствия резонанса их средних движений. Под действием возмущения ЛК элементы орбиты астероида, такие как эксцентриситет и наклон, изменяются согласованно. Это происходит благодаря тому, что они связаны соотношением: $(1 - e^2) \cos^2(i) = \text{const}$. Согласованность изменения элементов заключается в том, что, когда эксцентриситет растёт и достигает максимума при значениях аргумента перигелия $\omega = 90^\circ$ и 270° , наклон орбиты уменьшается и достигает в этих точках минимума. В случае очень больших наклонов наблюдается либрация аргумента перигелия около этих же значений 90° или 270° . Но следует сказать, что в группе Гильды нет астероидов, орбиты которых имеют достаточно большой наклон, необходимый для возникновения либрации.

Действие возмущения ЛК в области резонансов было исследовано Ё. Козаи [4] полуаналитическим методом. Для резонанса 3:2 им было обнаружено, что максимум эксцентриситета и, соответственно, минимум наклона достигается при значениях аргумента перигелия $\omega = 0^\circ$ и 180° . Таким образом, в области группы Гильды эффект ЛК

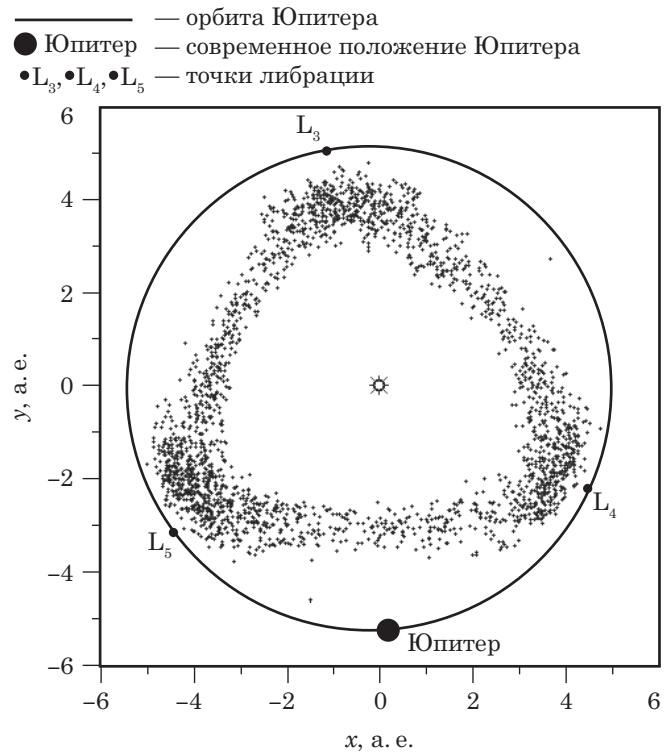


Рис. 1. Треугольник Гильды; точки представляют собой проекции координат астероидов группы Гильды на плоскость эклиптики

проявляется не так, как при отсутствии резонансов в главном поясе астероидов.

В данной работе исследование вековых возмущений в этой резонансной области производилось двумя другими независимыми методами. Во-первых, был использован метод численного интегрирования уравнений движения реальных астероидов на больших промежутках времени. Кроме того, для определения влияния возмущения ЛК на эволюцию наклонов орбит астероидов в области семейства (1911) Schubart был использован эмпирический метод вычисления собственных элементов, описанный в работах [5–8].

Исключение классических вековых возмущений в области группы Гильды

Оба типа вековых возмущений действуют совместно. В области высоких наклонов и больших эксцентриситетов преобладает возмущение ЛК, но подавляющая часть астероидов движется в области небольших и умеренных эксцентриситетов и наклонов орбит. Для этих астероидов амплитуда колебаний элементов под действием классического векового возмущения существенно превосходит амплитуду колебаний, вызванных возмущением ЛК. Для изучения эффекта ЛК необходимо каким-то образом исключить из оскулирующих элементов классические вековые возмущения.

Колебания элементов орбит, вызванные классическими вековыми возмущениями, хорошо

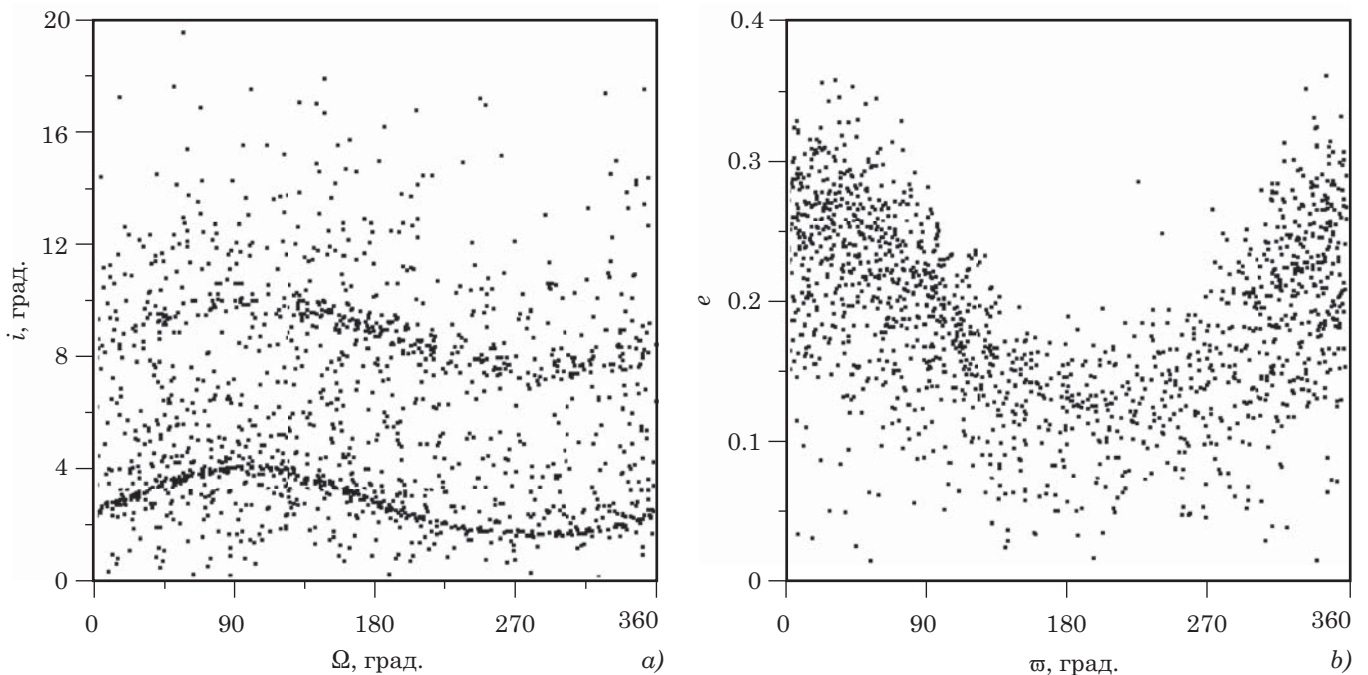


Рис. 2. Вид классических вековых возмущений на распределениях оскулирующих элементов орбит астероидов группы Гильды

видны на распределениях оскулирующих элементов, построенных для астероидов группы Гильды на рис. 2. На рис. 2а можно хорошо видеть зависимость наклонов орбит от долготы восходящего узла $i(\Omega)$, а на рис. 2б — зависимость эксцентриситетов от долготы перигелия $e(\varpi)$. Точки, образующие плотные волны близких к синусоиде кривых на рис. 2а, представляют собой элементы (i, Ω) орбит астероидов, принадлежащих отдельным семействам. Семейства хорошо выделяются на распределении благодаря большей плотности по сравнению с фоновой составляющей. Верхняя волна образована астероидами семейства (153) Hilda, а нижняя — плотным семейством (1911) Schubart.

Семейства астероидов являются результатом катастрофического столкновения и разрушения астероидов. Первоначально орбиты фрагментов, возникших при столкновении, были близки, но под действием планетных возмущений претерпели заметные изменения. Основную роль в эволюции орбит, как правило, играют наиболее долгопериодические, классические вековые возмущения. После их исключения может стать возможной идентификация семейств. Для исключения этих возмущений в нерезонансных областях достаточно воспользоваться результатами теории вековых возмущений [1]. Первые пять семейств астероидов были выделены К. Хираямой [9] в 1918 г. с использованием этой теории.

Для описания вековых возмущений были введены понятия «вынужденных» и «собственных»

элементов. Вынужденный наклон i_f и узел Ω_f являются элементами, описывающими ориентацию относительно эклиптики вынужденной плоскости, около которой прецессируют орбиты астероидов, не изменяя относительно неё своих наклонов. Таким образом, i_f представляет собой амплитуду колебания наклонов оскулирующей орбиты. Когда узел орбиты астероида совпадает с вынужденным узлом, наклон орбиты астероида к эклиптике максимален. Аналогично этому, вынужденный эксцентриситет e_f — это амплитуда колебания эксцентриситета, а вынужденная долгота перигелия ϖ_f — значение, при котором эксцентриситет максимален.

Вековая теория [1] даёт для области Гильды такие значения вынужденных элементов: $i_f = 1.29^\circ$ и $\Omega_f = 99.5^\circ$, $e_f = 0.043$ и $\varpi_f = 12^\circ$. Вынужденные элементы могут быть вычислены также с помощью эмпирического метода [5], использующего наблюдаемое распределение орбит астероидов в заданной области. В отличие от вековой теории этот метод позволяет вычислять вынужденные элементы и в резонансных областях. С использованием орбитальных данных для всех известных астероидов группы Гильды в работе [6] для этой области были вычислены вынужденный наклон $i_f = 1.20^\circ \pm 0.05^\circ$ и соответствующая долгота восходящего узла $\Omega_f = 99^\circ \pm 1^\circ$. Полученные значения практически совпадают с результатом вековой теории [1]. Но вычисленные эмпирическим методом значения вынужденного эксцентриситета $e_f = 0.069 \pm 0.002$ и вынужденной долготы перигелия $\varpi_f = 20 \pm 2^\circ$ за-

метно отличается от результата вековой теории. Таким образом, резонанс вносит значительные изменения в эволюцию эксцентриситетов.

Как было показано в работе [6], исключить классические вековые возмущения из оскулирующих элементов можно с помощью формулы преобразования координат. В случае наклонов орбит это ведет к переходу от плоскости эклиптики к вынужденной плоскости. Элементы, полученные после исключения вынужденной составляющей, называются собственными элементами. В действительности в настоящее время собственными элементами принято считать неизменные элементы, вычисленные в результате исключения всех возможных возмущений. Но в данной работе такими будут называться элементы, полученные в результате исключения только классических вековых возмущений.

После исключения классических вековых возмущений, синусообразные кривые на рис. 2 должны превратиться в прямые линии на распределениях соответствующих собственных элементов. При этом на распределениях (i_p, ω_p) и (e_p, ω_p) могут стать заметны возмущения ЛК. Собственный аргумент перигелия ω_p отсчитывается от положения собственного узла Ω_p , расположенного на вынужденной плоскости. В работе [10] таким способом была исследована амплитуда колебаний элементов под действием возмущения ЛК в семействах астероидов главного пояса. Для 33 выбранных семейств были вычислены амплитуды колебаний эксцентриситета и наклона орбит.

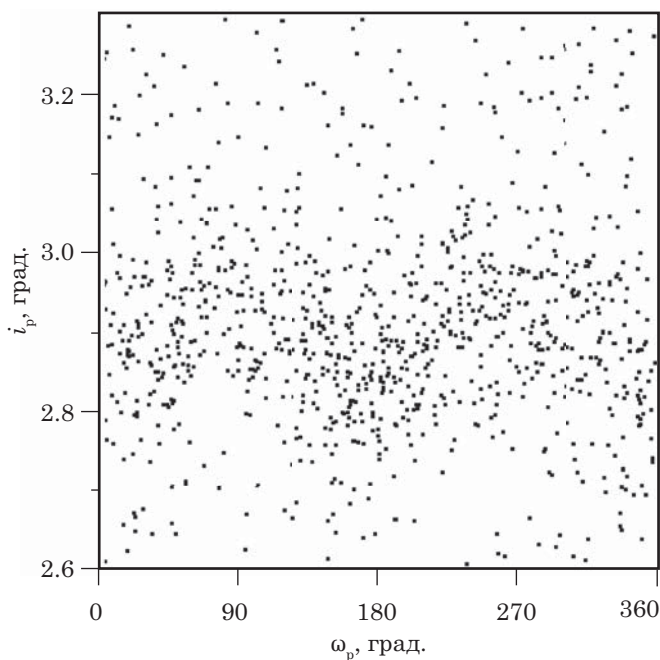


Рис. 3. Область семейства (1911) Schubart. Возмущение ЛК на распределении собственных элементов (i_p, ω_p) , полученных после исключения классического векового возмущения, имеет необычный вид

В группе Гильды, как это показано на рис. 2, существует всего два достаточно крупных семейства. При этом описанным способом можно выделить колебания наклонов, вызванные возмущением ЛК, только для очень плотного семейства (1911) Schubart. Приняв для этой области значения вынужденных элементов из работы [5] $i_f = 1.20^\circ$, $\Omega_f = 99^\circ$, и произведя преобразование, получим собственные элементы i_p , Ω_p , ω_p для всех астероидов данной области. Теперь на распределении элементов (i_p, ω_p) , построенном для области семейства (1911) Schubart, можно видеть действие возмущения ЛК (рис. 3). Следует обратить внимание на то, что вместо минимумов наклона при значениях аргумента перигелия $\omega = 90^\circ$ или 270° здесь наблюдаются максимумы.

Соответствующих колебаний эксцентриситета на распределениях (e_p, ω_p) таким методом получить не удалось ввиду их незначительности. Поэтому для более полного изучения возмущения ЛК в этой области был использован другой метод.

Численное интегрирование

Для выявления возмущения ЛК в области группы Гильды был использован метод численного интегрирования уравнений движения в рамках упрощенной динамической модели. В качестве единственного возмущающего тела был взят Юпитер, движущийся по фиксированной эллиптической орбите. В рассматриваемой резонансной области движение астероидов очень сложно и согласовано с движением Юпитера. Элементы орбит астероидов связаны различными условиями, поэтому произвольно задавать начальные элементы для интегрирования орбит нельзя. Для интегрирования использовались реальные астероиды из данной области. Элементы орбиты Юпитера были зафиксированы на момент времени, соответствующий эпохе элементов астероидов.

Рассмотрим исключение классических вековых возмущений на примере астероида (153) Hilda. В результате интегрирования уравнений движения на интервале времени 5000 оборотов Юпитера для этого астероида получены графики изменения элементов (рис. 4). Эти графики хорошо согласуются с наблюдаемым распределением оскулирующих элементов для всей популяции в целом (рис. 2). За один оборот узла аргумент перигелия совершает около 7.5 оборотов. За время одного оборота аргумента перигелия наклон совершает два колебания под действием возмущения ЛК, то есть имеет два максимума и два минимума. Поэтому на основной гармонике на рис. 4а можно сосчитать 15 вторичных максимумов и минимумов.

Как было сказано выше, в группе Гильды классические вековые возмущения наклонов, вычисленные эмпирическим методом, согласуются с вековой теорией. Но используемая эмпирическим

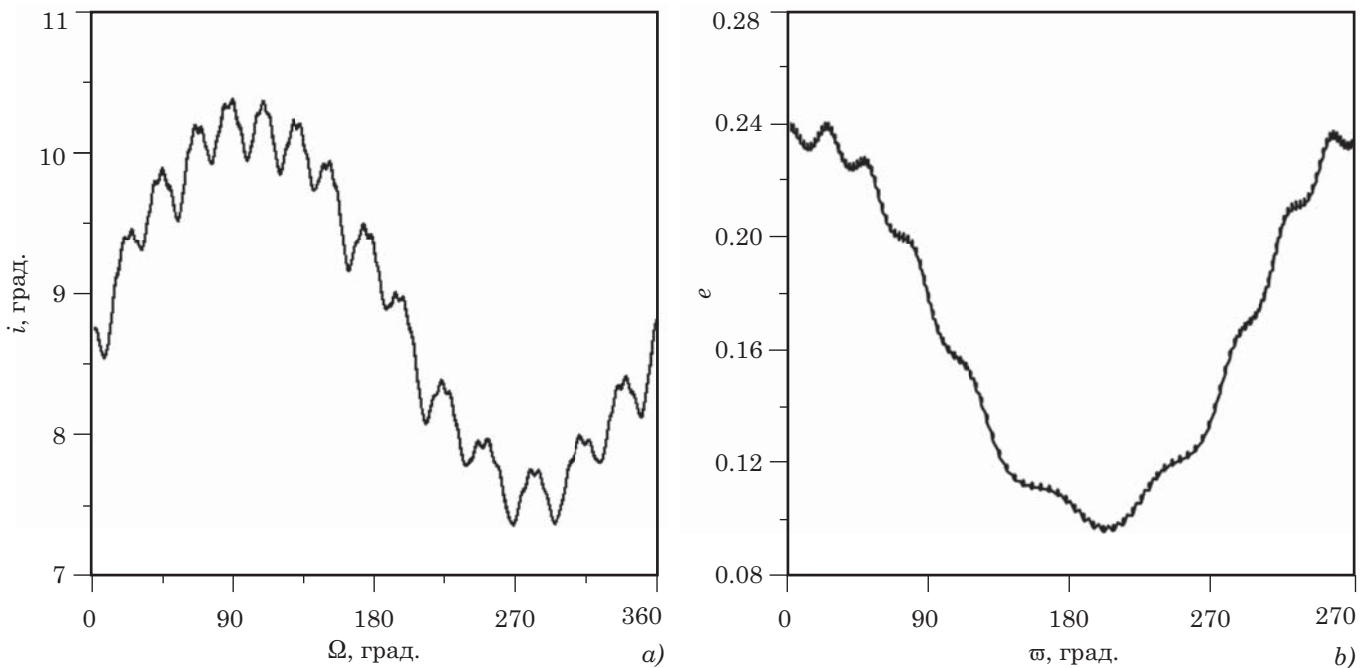


Рис. 4. Результаты численного интегрирования показывают классические вековые возмущения оскулирующих элементов орбиты астероида (153) Hilda

методом картина распределения элементов сформировалась под влиянием всех возможных возмущений. Точно так же в вековой теории рассматриваются возмущения от всех больших планет. Но упрощённая динамическая модель, используемая при интегрировании, ограничена учётом возмущений только от Юпитера, поэтому в качестве вынужденной плоскости следует рассматривать плоскость орбиты Юпитера. Таким образом, для исключения первой гармоники, соответствующей классическому вековому возмущению наклона, были использованы вынужденные элементы $i_f = 1.3^\circ$, $\Omega_f = 100.5^\circ$.

Наблюдаемые колебания второго порядка на графике изменения эксцентриситета на рис. 4b не связаны с возмущением ЛК. Эти колебания вызваны согласованным изменением эксцентриситета при либрации большой полуоси орбиты астероида. Амплитуда колебания эксцентриситета, вызванная либрацией полуоси, может значительно превосходить амплитуду, вызванную эффектом ЛК. Так же, как и в случае наклонов орбит, мы не можем использовать для исключения классического векового возмущения эксцентриситета результаты, полученные эмпирическим методом, поскольку они включают возмущения от всех планет. Для упрощённой динамической модели эти элементы будут другими.

Методом численного интегрирования была исследована эволюция орбит для двух десятков астероидов в этой области. На основании полученных данных можно сделать вывод, что вынужденная

долгота перигелия в используемой модели соответствует приблизительно положению перигелия Юпитера около 14° , но может немного отличаться для разных астероидов. Что касается вынужденного эксцентриситета, то для астероидов с разными орбитальными элементами его значение может лежать в пределах от 0.060 до 0.085. По этой причине исключение классического векового возмущения эксцентриситета для выявления возмущения ЛК производилось индивидуально для каждого астероида. Для астероида (153) Hilda были вычислены такие вынужденные элементы: $e_f = 0.068$, $\omega_f = 14^\circ$.

Результаты

После исключения классических вековых возмущений остаточные колебания элементов представляют собой сумму короткопериодических и ЛК возмущений. Если теперь в качестве оси абсцисс использовать собственный аргумент перигелия ω_p , проявится возмущение ЛК. На рис. 5 можно видеть, как изменяются наклон и эксцентриситет орбиты астероида (153) Hilda под действием возмущения ЛК после исключения классических вековых возмущений. Полная картина изменения элементов может быть получена только после нескольких оборотов перигелия. Тогда становится зачерченной вся область возможных значений элементов.

Обращает на себя внимание специфический вид графика наклона с раздвоенными максимумами и минимумами на рис. 5a. Это является

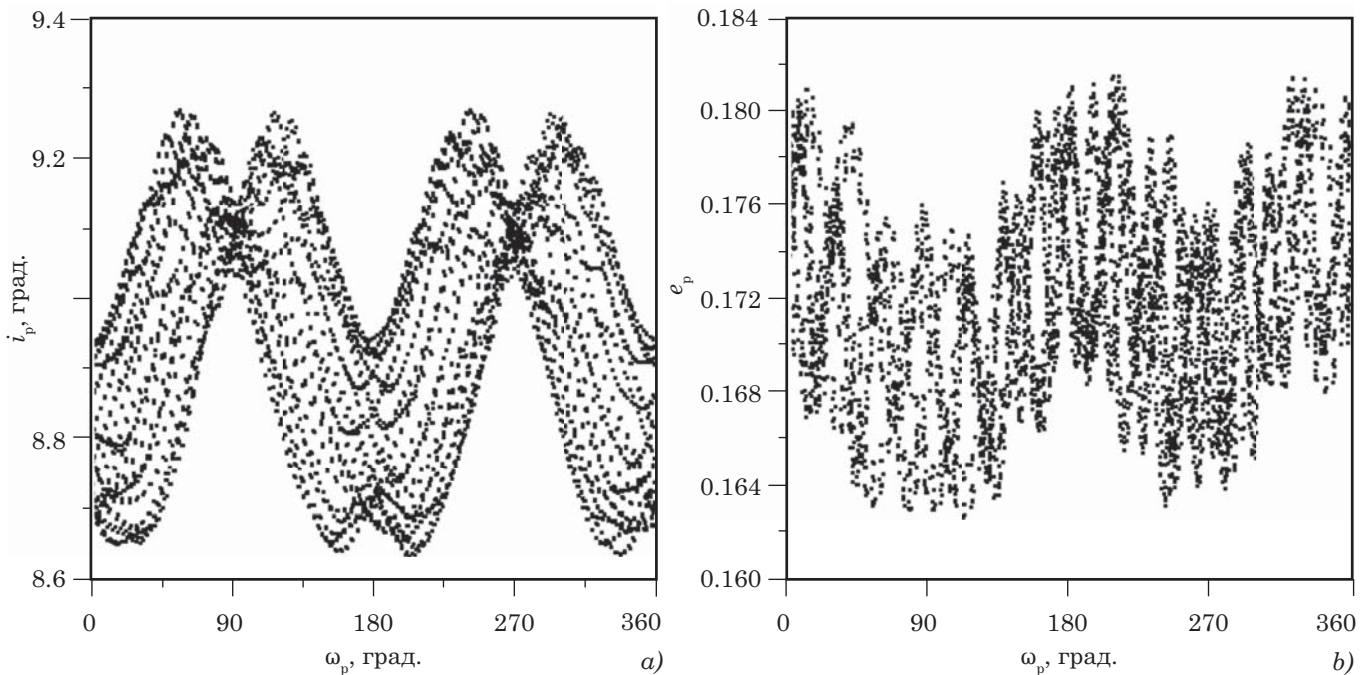


Рис. 5. Возмущения Лидова – Козаи для астероида (153) Hilda от Юпитера, движущегося по эллиптической орбите

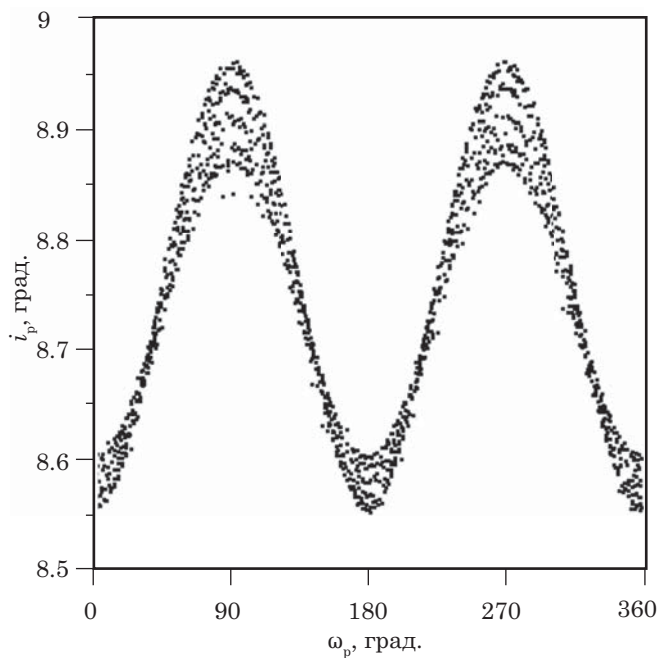


Рис. 6. Возмущение Лидова – Козаи в наклоне орбиты астероида (153) Hilda от Юпитера, движущегося по круговой орбите

следствием эллиптичности орбиты Юпитера. Если орбиту Юпитера взять круговой, тогда график будет более гладким (рис. 6).

На рис. 5 хорошо видно, что наклон и эксцентриситет меняются согласованно, как того требует механизм ЛК. Но тем не менее действие возмущения существенно отличается от того, как оно проявляется в главном поясе астероидов. Максимум

эксцентриситета и соответственно минимум наклона наблюдаются не при значении аргумента перигелия 90° и 270° , а около 0° и 180° . При значениях 90° и 270° наоборот имеет место минимум эксцентриситета и максимум наклона. Можно сказать, что обычные графики изменения элементов перевернуты или смещены на 90° .

Можно видеть, что короткопериодические возмущения эксцентриситета велики, в данном случае они сравнимы с самим возмущением ЛК. Для орбит с относительно большими наклонами и эксцентриситетами возмущение ЛК проявляется более чётко, с заметной амплитудой. При небольших наклонах меньше 5° колебания эксцентриситета невозможно определить ввиду их малости по сравнению с короткопериодическими возмущениями. Колебания наклона, как правило, проявляются на графике значительно лучше, но при небольших эксцентриситетах (меньше 0.05), амплитуда колебаний наклонов тоже не всегда обнаруживается.

Описанным способом была исследована эволюция элементов орбит двух десятков астероидов. Для большинства из них картина изменения элементов такая же, как для астероида (153) Hilda. Тем не менее для некоторых астероидов был получен другой результат. Например, для астероида (96086) Toscanos изменение элементов на рис. 7 происходит обычным способом, как это свойственно астероидам главного пояса. В результате сравнения различных характеристик орбит исследуемых астероидов был сделан вывод, что характер изменения элементов под действием возмущения

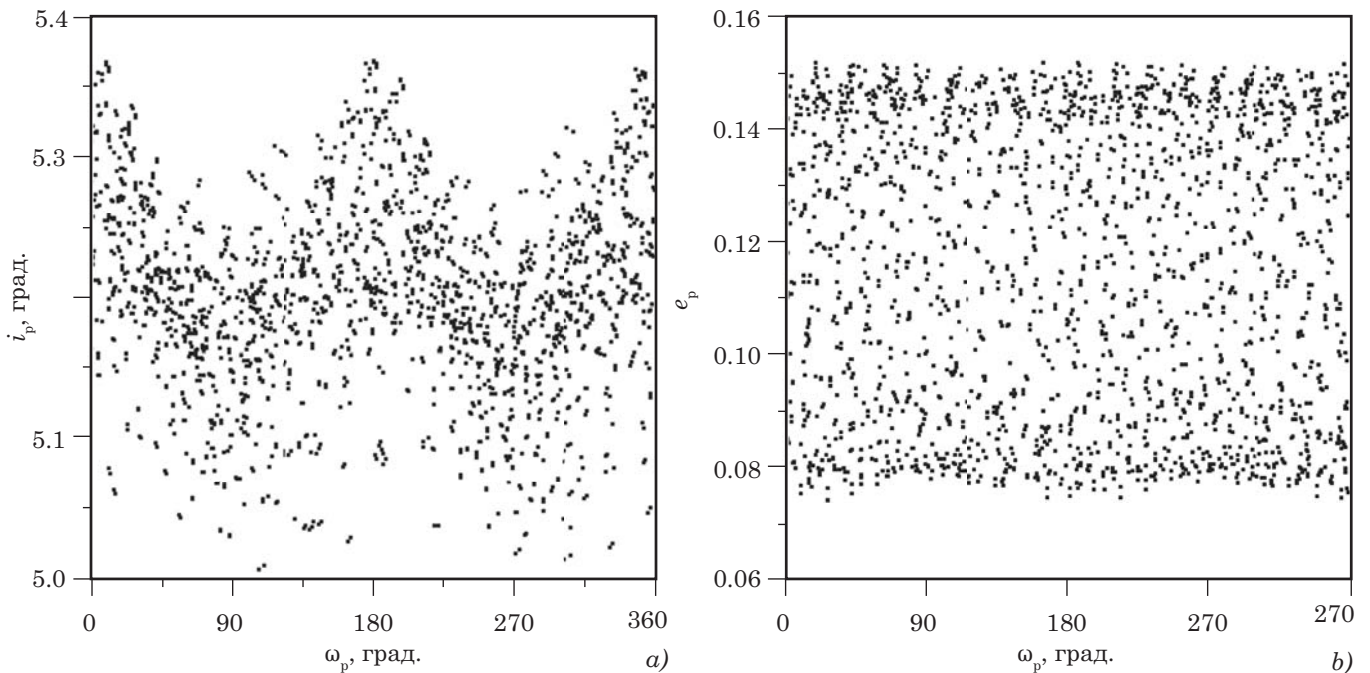


Рис. 7. Возмущения Лидова – Козаи для астероида (96086) Toscanos из группы Гильды; изменение наклона орбиты имеет обычный вид, свойственный астероидам главного пояса, характер изменения эксцентриситета трудно определить

ЛК зависит от амплитуды либрации большой полуоси орбит. При относительно большой амплитуде либрации действие ЛК такое же, как в главном поясе, графики имеют обычный вид. Это можно объяснить тем, что большую часть времени подобный астероид проводит вдали от точного резонанса, где характер испытываемого возмущения другой. Граница между этими областями лежит вблизи амплитуды либрации 0.04–0.05 а.е. Для орбит вблизи этой границы невозможно установить характер изменения элементов под действием возмущения ЛК.

Заключение

В данной работе было исследовано влияние возмущения ЛК на эволюцию эксцентриситетов и наклонов орбит астероидов в группе Гильды. В отличие от Ё. Козаи, использовавшего для этого полуаналитический метод, здесь были применены два других метода. Во-первых, возмущения ЛК были выявлены с помощью эмпирического метода, использующего наблюдаемое распределение элементов орбит астероидов, сложившееся под действием возмущений от всех планет. Во-вторых, исследование было произведено с помощью численного интегрирования уравнений движения реальных астероидов. При этом учитывались возмущения только от Юпитера, движущегося по эллиптической орбите.

Оба метода показали согласующийся результат, заключающийся в том, что возмущение ЛК действует в этой резонансной области, но его дей-

ствие несколько отличается от того, как оно проявляется в нерезонансных областях главного пояса астероидов. Максимум эксцентриситета и соответственно минимум наклона наблюдается не при значении аргумента перигелия 90° и 270° , а при 0° и 180° . Это подтверждает выводы Ё. Козаи, полученные полуаналитическим методом.

При этом надо заметить, что такой необычный тип эволюции орбит под действием возмущения ЛК свойственен не всем астероидам в этой области. С использованием численного интегрирования было обнаружено, что для астероидов с относительно большой амплитудой либрации большой полуоси орбиты (> 0.05 а.е.) графики изменения элементов имеют обычный вид. Это имеет место, например для астероида (96086) Toscanos.

Литература

1. Brouwer D., van Woerkom A. J. J. The secular variations of the orbital elements of the principal planets // *Astron. Papers Amer. Ephemer.* 1950. Vol. 13. P. 81–107.
2. Лидов М. Л. Эволюция орбит искусственных спутников под воздействием гравитационных возмущений внешних тел // *Искусственные спутники Земли.* 1961. Т. 8. С. 5–45.
3. Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *The Astronomical Journal.* 1962. Vol. 67. P. 591.
4. Kozai Y. Secular perturbations of resonant asteroids // *Celestial Mechanics.* 1985. Vol. 36. P. 47–69.
5. Виноградова Т. А. Вычисление вынужденных элементов орбит астероидов // *Труды ИПА РАН.* 2011. Вып. 19. С. 205–210.

6. *Виноградова Т. А.* Семейства астероидов в группе Гильды // Труды ИПА РАН. 2014. Вып. 31. С. 73–78.

7. *Vinogradova T. A.* Identification of asteroid families in Trojans and Hildas // MNRAS. 2015. Vol. 454. P. 2436.

8. *Vinogradova T. A.* Empirical method of proper elements calculation and identification of asteroid families // MNRAS. 2019. Vol. 484. P. 3755.

9. *Hirayama K.* Groups of asteroids probably of common origin // Astron. J. 1918. Vol. 31. P. 185–188.

10. *Vinogradova T. A.* Amplitude of the Lidov – Kozai i - and e -oscillations in asteroid families // MNRAS. 2017. Vol. 468. P. 4719.