

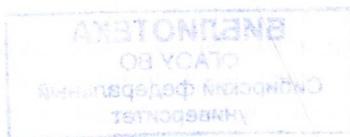
Сергей Иванович Ипатов

Формирование и эволюция планетных систем



Сергей Иванович Ипатов

Формирование и эволюция планетных систем



2025

УДК 523
ББК 22.65
И76

Ипатов Сергей Иванович

Формирование и эволюция планетных систем / Сергей Иванович Ипатов, 2025.
– 132 с.

ISBN 978-5-6055159-1-3

В книге рассматриваются различные проблемы формирования и эволюции планетных систем. Большая часть исследований посвящена Солнечной системе. Изучается коллапс досолнечного облака и аккумуляция планет. Рассматривается формирование системы Земля-Луна, двойных транснептуновых объектов и осевых вращений планет. Обсуждается формирование астероидного и транснептунового поясов, в том числе эволюция резонансных орбит астероидов и образование люков Кирквуда в астероидном поясе. Исследуется миграция тел в ходе формирования Солнечной системы и в настоящее время, в том числе обсуждается доставка ледяных тел из-за линии льда к планетам земной группы и формирование кратеров на Луне. Говорится о миссии Дип Импакт, в ходе которой произошло столкновение ударного модуля космического аппарата с кометой Темпеля 1. Рассматривается миграция пыли в Солнечной системе и формирование зодиакального пояса, а также миграция тел и пылевых частиц, выброшенных с планет земной группы и Луны. Изучается также миграция тел в некоторых экзопланетных системах (Проксима Центавра, Траппист 1 и Глизе 581), спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений, а также эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов.

Книга утверждена к публикации решением Ученого Совета Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) от 27.11.2025.

Данная публикация подготовлена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН.

Рецензент:

Главный научный сотрудник ГЕОХИ РАН, д.х.н., член-корреспондент РАН *О.Л. Кусков*

554945



УДК 523
ББК 22.65

18+

ISBN 978-5-6055159-1-3

© Сергей Иванович Ипатов, 2025
© Издатель С. И. Ипатов, 2025

<https://dx.doi.org/10.17513/np.649>

Введение

В данной книге на основе публикаций автора рассматриваются различные проблемы формирования и эволюции планетных систем. Большая часть исследований посвящена Солнечной системе. Рассматривается коллапс досолнечного облака, аккумуляция планет земной группы, формирование системы Земля-Луна, двойных транснептуновых объектов и осевых вращений планет. Исследуется миграция тел в ходе формирования Солнечной системы и в настоящее время, в том числе обсуждается доставка ледяных тел из-за линии льда к планетам земной группы и формирование кратеров на Луне. Рассматривается эволюция резонансных орбит астероидов и образование люков Кирквуда в астероидном поясе. Рассказывается о наблюдениях астероидов и комет и о моделях для определения вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей. Говорится о миссии Дип Импакт (Deep Impact), в частности об удалении следов космических лучей со снимков, сделанных этим космическим аппаратом, и о выбросе вещества с кометы 9P/Темпеля 1 после столкновения ударного модуля космического аппарата Дип Импакт с этой кометой. Исследуется миграция пыли в Солнечной системе и формирование зодиакального пояса, а также миграция тел и пылевых частиц, выброшенных с планет земной группы и Луны. Рассматривается также миграция тел в некоторых экзопланетных системах (Проксима Центавра, Траппист 1 и Глизе 581), спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений, а также эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов. Кратко говорится о некоторых неастрономических задачах, которыми занимался автор. Обсуждаются исследования генерации акустических волн под воздействием флюидов на стенки пор и их распространения в пористой среде с флюидами и газом.

Книга рассчитана на обычного читателя, интересующегося астрономией, и материал излагается в основном на популярном уровне. Читатель, заинтересованный в более детальном изложении материала, может посмотреть публикации автора по интересующей его теме. Большинство публикаций С.И. Ипатова на английском языке и его монографию [78] на русском языке, суммирующую результаты Ипатова в 20 веке, можно скачать и прочесть бесплатно по интернетовским ссылкам в списке публикаций, приведенном во второй части книги. Интернетовские ссылки на публикации С.И. Ипатова можно найти на сайте <https://siipatov.webnode.ru/publications> и в файле https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqClmk30ggMYFBAAAAABye6tCmVUGVWRphNZ_k-Wlg?e=DjHucX (там список публикаций приведен в другом порядке). На этих сайтах можно будет найти также ссылки на публикации Ипатова, которые выйдут после издания данной книги (написание ряда статей по уже проведенным расчетам отложено до завершения подготовки книг). Там же можно будет найти и ссылку на файл с данной книгой. Этот файл в формате docx можно скачать с сайта https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ETczmLUVNmNliXcDuG8av_kBO0N_WKVFeZfJeWQ2qbbqD1A?e=tOaKMC. После публикации книги я постараюсь также положить этот файл на сайты <https://www.litres.ru/author/sergeyivanovich-ipatov/>, https://www.researchgate.net/profile/S_Ipatov/publications и <https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> (в раздел books). Большинство статей С.И. Ипатова можно бесплатно скачать с сайтов <https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> (на этот сайт выкладывались и фотографии страниц статей, которые не существуют в оцифрованном виде), https://www.researchgate.net/profile/S_Ipatov/publications и <http://arxiv.org>. Читателю, интересующемуся интернетовскими ссылками, удобнее иметь доступ к файлу книги или к файлу со списком публикаций даже при наличии печатного экземпляра.

Ссылки на публикации других авторов приводятся в тексте, а не в конце книги. Ссылки на гораздо большее число публикаций других авторов можно найти в статьях Ипатова. В монографии [78] было 687 ссылок на публикации, а в обзорной статье [59] – 400 ссылок. Общее же число ссылок на публикации разных авторов во всех публикациях Ипатова гораздо больше, и объем книги увеличился бы в несколько раз, если приводить подробные ссылки на работы разных авторов. Поэтому в книге число ссылок на работы других авторов ограничено. Темы многих разделов книги заслуживают того, чтобы на эти темы были написаны отдельные книги. Подробное изложение материала привело бы к большому объему книги и было бы интересно только специалистам, в то время как оно доступно бесплатно при использовании интернетовских ссылок (по ссылкам читатель может подробнее прочесть то, что ему интересно). Статьи Ипатова доступны бесплатно в основном на английском языке, которым владеет любой научный работник. Рисунки и таблицы в книге приводятся нечасто, и их нумерация своя в каждом разделе, так как на них нет перекрестных ссылок

между различными разделами. Гораздо большее число рисунков и таблиц по рассматриваемым темам можно найти в публикациях С.И. Ипатова.

Данная книга может служить путеводителем по публикациям автора. Она представляет собой краткий обзор полученных С.И. Ипатовым результатов и общие сведения по рассматриваемым темам. Обычный читатель получит общее представление об излагаемом материале (и ему вряд ли будут интересны детали). Заинтересованный читатель может выбрать, какие публикации он хотел бы бесплатно скачать из интернета, посмотреть их и ознакомиться с интересующей его темой гораздо более подробно, в том числе и с многочисленными ссылками на публикации других авторов. Обзоры работ С.И. Ипатова по формированию и эволюции планетных систем приведены в монографии 2000 года [78], в статьях [59] и [64] и в научно-популярной статье [77]. В главе 1 монографии [78] приводятся общие сведения о Солнечной системе (в том числе о планетах, астероидах, кометах, кратерах, метеоритах, метеорных потоках). Данная книга первоначально была написана как одно из приложений к будущей книге о встречах с астрономами. Сначала я начал писать приложения к этой будущей книге, но потом, увидев большой размер приложений, решил публиковать их отдельно. Приложение по истории России вышло как книга [537]. Приложение о результатах, полученных С.И. Ипатовым, стало данной книгой. Еще одно пока незаконченное приложение с фотографиями ученых можно найти на <https://siipatov.webnode.ru/link-to-albums-with-photos>.

Автор приветствует свободное распространение этой книги в электронной или печатной форме, не возражает против ее выкладки на различных сайтах и не претендует ни на какие авторские отчисления при ее печати или другом распространении.

Данная публикация подготовлена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

1. Коллапс досолнечного облака и вброс в него короткоживущих радиоизотопов при столкновении облака с ударной волной сверхновой

Под руководством Алана Босса (Alan Boss) в 2007 г. Ипатов проводил расчеты коллапса досолнечного облака и вброса в него короткоживущих радиоизотопов при столкновении облака с ударной волной сверхновой [36, 38, 97, 377, 382, 392]. Космохимические доказательства существования короткоживущих радиоизотопов (SLRI), таких как ^{26}Al и ^{60}Fe , во время формирования примитивных метеоритов требуют, чтобы эти изотопы были синтезированы в массивной звезде, а затем включены в хондриты в течение $\sim 10^6$ лет. Долгое время предполагалось, что ударная волна сверхновой перенесла SLRI в ядро плотного досолнечного облака, вызвала коллапс облака и инжектировала изотопы. В наших расчетах с помощью гидродинамического алгоритма адаптивного уточнения сетки (AMR) FLASH2.5 было показано, что ударная волна со скоростью 20 км/с действительно может вызвать коллапс облака с массой Солнца, одновременно впрыскивая изотопы ударной волны в коллапсирующее облако. Эти расчеты подразумевают, что гипотеза триггера сверхновой является наиболее вероятным механизмом доставки SLRI, присутствующих во время формирования Солнечной системы. Эти модели показывают [36], что при включении охлаждения молекулами H_2O , CO_2 , и H_2 ударная волна 20 км/с способна вызвать гравитационный коллапс стабильного, плотного ядра облака солнечной массы, а также впрыскивать соответствующие количества материала ударной волны сверхновой в коллапсирующее ядро облака. Этот инжектированный материал состоит из газа ударной волны, а также пылевых частиц, достаточно малых, чтобы оставаться связанными с газом, т. е. субмикронных размеров, которые, как ожидается, характеризуют ударные волны сверхновых и несут SLRI, продукты распада которых были обнаружены в тугоплавких включениях хондритовых метеоритов. Эти модели оказывают сильную поддержку гипотезе о том, что ударная волна сверхновой, несущая SLRI, могла спровоцировать образование Солнечной системы.

Были также проведены аналогичные расчеты [38] со скоростями ударных волн в диапазоне от 1 км/с до 100 км/с. Мы обнаружили, что скорости ударных волн в диапазоне от 5 км/с до 70 км/с способны вызвать коллапс облака с массой, равной 2.2 массам Солнца, одновременно впрыскивая материал ударной волны. Ударные волны с меньшей скоростью не вызывают впрыска, в то время как ударные волны с большей скоростью не вызывают устойчивого коллапса. Расчеты подтверждают гипотезу триггера ударной волны для формирования Солнечной системы, хотя эффективность впрыска в существующих моделях ниже желаемой. При включении охлаждения соответствующими молекулами, ударные волны со скоростями в диапазоне от 5 до 70 км/с

способны вызвать гравитационный коллапс стабильных, плотных ядер облаков, а также впрыскивать материал ударной волны в коллапсирующие ядра облаков.

2. Эволюция двух близких гелиоцентрических орбит гравитационно взаимодействующих тел

Подробнее об эволюции двух близких гелиоцентрических орбит гравитационно взаимодействующих тел можно прочитать в главе 2 монографии [78]. Эта глава основана на статьях [1, 16-17] и препринтах [218-219, 232]. Исследования взаимодействия двух планетезималей (или планеты и планетезимали), являющегося элементарным процессом в протопланетном диске, позволяют лучше понять процесс эволюции этого диска, оценить зоны питания растущих планет и влияние планетезималей на эволюцию близких орбит других планетезималей. Планетезималиями называют тела, из которых формировались планеты. Планетезимали образовались в протопланетном диске при сжатии разреженных газопылевых сгущений. Формирование планетезималей обсуждалось нами в параграфе 2.3 обзора [59]. «Греческие» и «тройские» астероиды Юпитера движутся в резонансе 1:1 с движением Юпитера в окрестностях точек Лагранжа L_4 и L_5 . «Греки» движутся вокруг Юпитера на 60° впереди, а «тройцы» - на 60° позади.

Взаимное гравитационное влияние двух материальных точек (МТ), движущихся вокруг массивного центрального тела - Солнца в одной плоскости по первоначально близким орбитам, учитывалось путем численного интегрирования уравнений движения. Материальные точки имеют массы, но не имеют размеров. Путем численного интегрирования **плоской задачи трех тел** исследована эволюция орбит около тысячи пар гравитационно взаимодействующих объектов - материальных точек (МТ), движущихся вокруг Солнца. Изучены характерные изменения орбит для следующих типов эволюции орбит: движения около треугольных точек либрации по головастикообразным и подковообразным синодическим орбитам (N- и M-типы), случай возможных тесных сближений (до радиуса сферы действия) объектов (A-тип) и хаотические изменения элементов орбит, при которых невозможны тесные сближения МТ (C-тип). Отношение μ_1 массы большей МТ к массе Солнца варьировалось от 10^{-9} до 10^{-3} , рассматривалась не только ограниченная задача трех тел, но и случай одинаковых масс МТ ($\mu_1=\mu_2$, μ_2 - отношение массы меньшей МТ к массе Солнца). Рассматриваемый интервал времени в большинстве серий расчетов равнялся 2500 или 25000 оборотам МТ вокруг Солнца.

При N-типе графики изменений больших полуосей a орбит МТ со временем t имеют N или I-образный вид. В этом случае в синодических (вращающихся вокруг Солнца с угловой скоростью, равной угловой скорости первой МТ) координатах орбита второй МТ охватывает одну треугольную точку либрации и при почти нулевых эксцентриситетах e орбит имеет вид головастика (серпа). Вершина этих координат лежит в Солнце, одна из осей направлена на первую МТ, а вторая ось координат перпендикулярна первой оси.

В случае M-типа графики зависимости больших полуосей a орбит от времени t имеют M или П-образный вид. В синодических координатах орбита второй МТ охватывает обе треугольные точки либрации. В случае первоначально круговых сидерических орбит синодическая орбита имеет подковообразный вид. Расстояние от Солнца до МТ, движущейся по эксцентричной орбите, меняется за время ее оборота вокруг Солнца от $a(1-e)$ до $a(1+e)$. Поэтому при немалых эксцентриситетах e синодические орбиты имеют более сложный вид, чем при первоначально круговых сидерических орбитах [218]. Даже при начальных нулевых эксцентриситетах орбит в случае $\mu_1=\mu_2=10^{-3}$, в синодических координатах подковообразная орбита за синодический период обращения несколько раз самопересекалась при угле φ между направлениями из Солнца на МТ, близком к 180° [218]. Аналитические формулы зависимости разности больших полуосей орбит МТ от угла с вершиной в Солнце между направлениями на МТ рассмотрены в [16, 218].

Тесные сближения тел (до радиуса сферы Хилла $r_s=a(\mu_1/3)^{1/3}$ или радиуса сферы действия $r_s=a(\mu_1)^{2/5}$) возможны только при A-типе. Изменения элементов орбит в этом случае являются хаотическими и большие полуоси орбит МТ в некоторые моменты времени одинаковы. При C-типе элементы орбит меняются хаотически, но тесных сближений МТ нет и значения больших полуосей орбит МТ не могут стать одинаковыми. При P-типе a и e меняются периодически, а синодическая орбита второй МТ охватывает Солнце так же, как и при хаотических изменениях. Для этого типа можно выделить большое число подтипов, каждый из которых характеризуется своими взаимосвязями изменений элементов орбит. Для окрестности резонанса 5:2 с движением Юпитера эти взаимосвязи рассмотрены в следующем разделе.

Со временем некоторые N-орбиты могут переходить в M-орбиты, а C- и M-орбиты - в A-орбиты. Через время $t > 100T_s$ (T_s - синодический период обращения) такие переходы между типами орбит редки. В случае **первоначально круговых орбит** ($e_0=e^0=e^0_1=0$, e^0_1 и e^0_2 - эксцентриситеты орбит МТ) при исходном угле с вершиной в Солнце между направлениями на объекты $\varphi_0=60^\circ$, $10^{-9} \leq \mu_1 \leq 10^{-4}$ и рассматриваемом интервале времени $T_0 \sim 10^4 t_0$ (t_0 - время одного оборота первой МТ вокруг Солнца) максимальные значения $\varepsilon_0=(a^0_2-a^0_1)/a^0_1$ (где a^0_1 и a^0_2 - начальные значения больших полуосей орбит МТ) для N-, M-, A- и C-типов N_i получены [16] равными соответственно $\alpha=(1.63-1.64)\mu^{1/2}$, $\beta=(0.77-0.81)\mu^{1/3}$, $\gamma=(2.1-2.45)\mu^{1/3}$ и $\delta=(1.45-1.64)\mu^{2/7}$, где $\mu=\mu_1+\mu_2$. При других значениях φ_0 значения α , β и δ , как правило, меньше. В случае $\mu_1=10^{-3}$ M-орбиты неустойчивы, для $\varphi_0=60^\circ$ получено $\alpha=\beta \approx 0.5\mu^{1/3}$, $\gamma=(1.8-2.1)\mu^{1/3}$ и $\delta=(2.3-2.4)\mu^{2/7}$, а при других φ_0 значения δ могли быть меньше на треть. При $\mu_1 \leq 10^{-5}$ значения γ и δ при варьировании φ_0 в основном отличались не более, чем на 10%. В протопланетном диске каждая планетезималь могла тесно сближаться с несколькими соседними планетезиμαлями.

При $10^{-9} \leq \mu_1 \leq 10^{-4}$ и $\varphi_0=60^\circ$ доля M-орбит, т.е. отношение $(\beta-\alpha)/\delta$, меняется в пределах от 0.18 до 0.25. Чем меньше μ_1 , тем меньше доли N- и A-орбит и тем больше доля C-орбит. При $\mu_1=\mu_2=10^{-9}$ доли C- и A-орбит примерно одинаковы ($\gamma-\beta \approx \delta-\gamma$). В ряде случаев при некоторых ε_0 , принадлежащих подобласти, лежащей внутри интервала $[\beta, \gamma]$, были получены C-орбиты, а при некоторых ε_0 , находящихся в диапазоне $[\gamma, \delta]$, элементы орбит менялись периодически.

Движение около треугольных точек либрации исследовалось не только численно, но и аналитически. При $\varepsilon_0=0$ получено, что минимальные значения φ_0 , соответствующие N- и M-типам, близки к 0.4 и $4\mu^{1/3}$ радиан соответственно. При этих типах графики изменений большой полуоси a орбиты со временем имеют N- или M-образный вид. Чем меньше μ , тем ближе M-образные изменения a к П-образным изменениям. Периоды изменений a со временем для N- и M-орбит максимальны при $\varepsilon_0 \approx \alpha$ и при этом могут в 2-6 раз превышать T_{sf} , где T_{sf} - синодический период обращения при движении МТ по фиксированным исходным орбитам.

В случае тесных сближений объектов (A-тип) графики изменений элементов орбит со временем, полученные при различных ($\leq 10^{-7}$) значениях ε_0 точности интегрирования на шаге, близки друг к другу в основном только до первого очень тесного сближения объектов. Однако, характер и пределы изменений элементов орбит для этих графиков примерно одинаковы. Варьирование ε_0 оказывает такое же влияние на изменения элементов орбит, как и варьирование исходных положений МТ на орбитах.

В случае $\mu_1 \leq 10^{-5}$ и $e_0=0$ максимальные эксцентриситеты e_{max} обычно не превышают $(7-8)\mu_1^{1/3}$ при $\mu_1 \gg \mu_2$ и $(4-6)\mu_1^{1/3}$ при $\mu_1=\mu_2$ для A-типа, а также не превышают $(4-6)\mu_1^{1/3}$ при $\mu_1 \gg \mu_2$ и $4\mu_1^{1/3}$ при $\mu_1=\mu_2$ для C-типа. Когда МТ движутся внутри сферы Хилла, оскулирующие эксцентриситеты их гелиоцентрических орбит могут быть значительно больше этих значений e_{max} . Максимальное удаление МТ от Солнца для A- и C-типов достигало соответственно $1+1.5\delta$ и $1+2\delta$ при $\mu_1=\mu_2=10^{-9}$ и $1+5.6\delta$ и $1+6.6\delta$ при $\mu_1=10^{-5} \gg \mu_2$.

Выше приведены данные для первоначально круговых орбит МТ. При больших исходных эксцентриситетах орбит значения β меньше, значения γ и e_{max} , как правило, больше, а α почти такое же, как и при меньших начальных значениях эксцентриситетов орбит МТ. При некоторых ориентациях орбит для типа M амплитуда долгопериодических изменений e может превышать e_0 . Полученные результаты позволяют в ряде случаев (например, при первоначально круговых орбитах) определять по начальным данным характер и пределы изменений элементов орбит двух гравитационно взаимодействующих объектов.

В ряде случаев (особенно при $\mu_1 \sim 10^{-5} \gg \mu_2$) для A-типа были получены **выходы тел-МТ на резонансные орбиты**. Обычно через несколько сотен оборотов тел вокруг Солнца эти резонансные соотношения нарушались. При большинстве рассмотренных резонансов ($T_2:T_1=2:1, 12:5, 13:5, 4:5, 6:5, 7:5, T_i$ - период обращения i -го тела вокруг Солнца) большие полуоси и эксцентриситеты орбит менялись периодически с небольшой амплитудой, а изменения долготы перигелия были невелики (рис. 2.1 и 2.4б в [78]). Движения около резонансов в этих случаях являются колебаниями около периодических решений, представляющих в синодических координатах замкнутые кривые. В варианте расчетов, представленном на рис. 2.4б в [78], при резонансах 6:5 и 5:4 большая полуось орбиты меньшего тела менялась незначительно, эксцентриситет почти монотонно возрастал, а долгота перигелия убывала. В этих случаях в синодических координатах кривая, около которой происходили малые колебания, не была замкнутой.

Множество исходных данных, при которых с начального момента времени движение тел (МТ) близко к периодическому движению, невелико, но при достаточно больших значениях массы

большого тела выходы на резонансные орбиты довольно часты. При $\mu_1=10^{-5}$ и ненулевых одинаковых начальных эксцентриситетах орбит в шести из десяти приведенных в [219] вариантах в ходе эволюции в течение более 200 оборотов первого тела средние движения тел были соизмеримыми. При меньших значениях μ_1 выходы на резонансные орбиты были получены реже и синодический период обращения при этом был значительным. Например, в случае, представленном на рис. 2.2г в [78], при числе оборотов вокруг Солнца (центрального тела) между 16000 и 17500, тела находились в резонансе 19:18. При этом значения эксцентриситета и долготы перигелия почти не менялись. Поэтому тела (например, кометы), орбиты которых пересекают орбиту какой-либо планеты-гиганта, заметную часть времени могут находиться в резонансе с этой планетой, если возмущения от других планет относительно невелики.

3. Эволюция орбит астероидов при резонансах с Юпитером

Эволюция орбит астероидного типа при резонансах 2:5, 1:3 и 1:2 с движением Юпитера рассматривалась Ипатовым в препринтах [220, 229-230, 213b], статьях [6, 8, 14, 29, 66] и в главе 3 монографии [78]. Эти отношения (2:5, 1:3 и 1:2) представляют собой отношения средних движений Юпитера и астероида (отношение периодов обращения вокруг Солнца астероида и Юпитера). Такие отношения рассматривались в СССР и России, когда были опубликованы статьи Ипатова по резонансам. В иностранной литературе, а также в современных публикациях в России обычно рассматриваются обратные отношения (5:2, 3:1 и 2:1) – отношения периодов обращения Юпитера и астероида. Поэтому в отличие от более ранних моих работ ниже я буду рассматривать отношения 5:2, 3:1 и 2:1, а не 2:5, 1:3 и 1:2. Основное внимание уделялось резонансу 5:2. Результаты этих расчетов использовались для объяснения происхождения люков Кирквуда 5:2 и 3:1. Люками Кирквуда называются области значений больших полуосей a орбит, которые соответствуют минимумам в распределении астероидов по a . Для этих люков отношение периодов обращения Юпитера и астероида вокруг Солнца близко к 3:1, 5:2, 2:1 или 7:3. В настоящее время наиболее популярна гипотеза происхождения люков Кирквуда, согласно которой в ходе эволюции эксцентриситеты резонансных орбит астероидов достигали значений, при которых перигелии их орбит лежали внутри орбиты Марса. Так как скорости изменений долготы перигелия и долготы восходящего узла орбиты различны для астероида и Марса, то такие астероиды могли покидать люк вследствие тесных сближений с Марсом. Уздом в 1982 для люка 3:1 и Шидлиховский в 1987 для люка 5:2 высказали эту гипотезу, основываясь на исследованиях хаотических орбит. Ипатов [6, 14, 230] независимо сделал аналогичное предположение о миграции из этих люков астероидов, двигавшихся по квазипериодическим орбитам. Его предположение основывалось на результатах препринта [220] 1980 года, в котором в случае соизмеримостей 5:2, 3:1 и 2:1 для ряда тестовых астероидов при квазипериодических изменениях эксцентриситетов e был получен рост e от 0.15 до 0.75, 0.45 и 0.35 соответственно.

Путем численного интегрирования полных уравнений движения задачи трех тел (Солнце-Юпитер-астероид) методом Bulsto Булирша-Штера были исследованы изменения со временем элементов орбит более 500 тестовых астероидов [6, 8, 14, 220, 229-230]. Отмечалось, что графики изменений элементов орбит со временем были одинаковыми при расчетах с точностью интегрирования на шаге, равной 10^{-8} , 10^{-9} или 10^{-10} . Начальные эксцентриситеты орбит астероидов обычно равнялись 0 или 0.15, но могли достигать 0.3. Начальные наклонения орбит обычно равнялись 0 или 10° , но могли достигать 30° . Впервые было получено, что в случае соизмеримости 5:2 максимальная (по различным начальным ориентациям орбит) область начальных значений больших полуосей и эксцентриситетов орбит, при которых тестовые астероиды за 10^5 лет достигают орбиты Марса, близка к области, свободной от реальных астероидов, и мало отличается от аналогичной области, при которой достигается орбита Земли (рис. 1). Зависимости этих областей (при расчетах и при наблюдениях) от наклонений орбит астероидов также примерно одинаковы. Многие тестовые астероиды, достигавшие в ходе эволюции орбиты Марса, достигали также орбиты Земли. Полученные результаты показывают, что тесные сближения астероидов с Марсом и Землей могли быть одной из причин образования люка Кирквуда 5:2 в астероидном поясе. Эффективный радиус Земли обычно не менее, чем в два раза превышает эффективный радиус Марса. Эффективным радиусом планеты называется величина прицельной дальности, при которой достигается планета (при вхождении тела в сферу Хилла планеты тело сталкивается с планетой, если минимальное расстояние между линией направления относительной скорости и центром масс планеты меньше эффективного радиуса). Поэтому метеориты, мигрировавшие из люка 5:2, возможно чаще выпадали на Землю, чем на Марс. Источниками пополнения групп Аполлона и

О книге С.И. Ипатова «Формирование и эволюция планетных систем»

Книга-Эссе Сергея Ивановича Ипатова «Формирование и эволюция планетных систем» представляет собой уникальный и многогранный труд, находящийся на стыке фундаментальной науки и научно-популярной литературы, и, предлагающий читателю масштабную панораму исследований, посвященных происхождению и развитию планетных систем, с особым акцентом на Солнечную систему.

Основу книги составляют обобщенные результаты многолетних исследований самого автора. Тематический охват работы впечатляет: от классических проблем коллапса протопланетного облака и аккумуляции планет земной группы до современных вопросов миграции тел, динамики астероидного пояса и формирования кратеров на Луне. Отдельного внимания заслуживают разделы, посвященные моделированию эволюции экзопланетных систем, а также практическим аспектам астрономии.

Главной особенностью данной работы является ее концепция. Это не классическая монография и не популярный пересказ уже известных фактов. Автор позиционирует свою книгу как «путеводитель по публикациям». Это ключ к пониманию ее структуры и целевой аудитории. В книге, эссе — навигаторе, автор высказывает личное мнение по заданной теме, используя аргументы и примеры из собственных работ. В книге 130 страниц, из которых 76 страниц текста, остальные содержат список тщательно пронумерованных публикаций из 537 наименований, включающих список всех авторских работ: статей, тезисов конференций, других небольших публикаций, стендовых и устных докладов, стендовых и устных докладов без тезисов – впечатляющая библиография. Автор сознательно ограничивает количество иллюстраций и ссылок на работы других ученых, чтобы не увеличивать объем, и вместо этого предоставляет читателю беспрецедентный доступ к первоисточникам своих работ.

Важнейшим достоинством книги является ее открытость. Автор щедро делится ссылками на свои работы, большинство из которых находится в открытом доступе на различных научных платформах. Книга С.И. Ипатова «Формирование и эволюция планетных систем» рекомендуется к публикации, она будет полезна любителям астрономии, студентам и аспирантам физико-астрономических специальностей, для которых она может стать отправной точкой для собственных исследований.

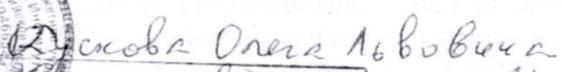
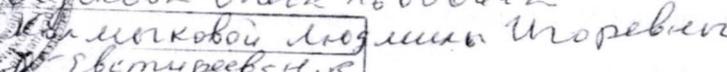
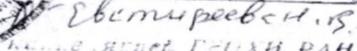
Главный научный сотрудник ГЕОХИ РАН, д.х.н.
член-корреспондент РАН

 /О.Л. Кусков/

Подпись члена-корреспондента РАН О.Л. Кускова заверяю
Ученый секретарь ГЕОХИ РАН, к.г.-м.н.

 /Л.И. Колмыкова/






Евстифьев Е.А.
член-корреспондент ГЕОХИ РАН

Contents

Introduction	3
THE SOLAR SYSTEM	
1. Collapse of the presolar cloud and injection of short-lived radioisotopes during the cloud's collision with a supernova shock wave	4
2. Evolution of two close heliocentric orbits of gravitationally interacting bodies	5
3. Evolution of asteroidal orbits for resonances with Jupiter	7
4. Modelling the evolution of celestial body orbits using the method of spheres	8
5. Accumulation of the terrestrial planets	11
6. Migration of bodies in the giant planet zone	17
7. Formation of the asteroid and trans-Neptunian belts	22
8. Formation of binary trans-Neptunian objects	25
9. Formation of the Earth-Moon system	25
10. Formation of planetary axial rotations	29
11. Migration of small bodies from various regions of the Solar System to the terrestrial planets	30
12. Variations in orbital elements of planets	37
13. Probabilities of near-Earth object collisions with Earth and the Moon and lunar craters	38
14. Dust migration in the Solar System and the formation of the zodiacal belt	41
15. Migration of bodies and dust particles ejected from the terrestrial planets and the Moon	44
16. Automatic removal of cosmic ray signatures on Deep Impact images	51
17. Ejection of material from comet 9P/Tempel 1 after the collision of the Deep Impact impactor with the comet	52
18. Observations of asteroids and comets	55
19. Models to determine the probability of detecting near-Earth objects in different areas of the sky	56
EXOPLANETS	
20. Spectra of Earth-like exoplanets with various rotation periods	57
21. Efficiency of exoplanet searches using microlensing observations with different telescopes	60
22. Migration of bodies and dust in the exoplanetary system of Proxima Centauri	63
23. Migration of bodies in the TRAPPIST-1 exoplanetary system	70
24. Migration of bodies in the Gliese 581 exoplanetary system	72
NON-ASTRONOMICAL STUDIES	
25. Minimising the number of transitions when routing two-layer microchips	76
26. Studies on the generation of acoustic waves by fluids on pore walls and their propagation in a porous medium with fluids and gas	76
Оглавление	
Введение	3
СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА	
1. Коллапс досолнечного облака и вброс в него короткоживущих радиоизотопов при столкновении облака с ударной волной сверхновой	4
2. Эволюция двух близких гелиоцентрических орбит гравитационно взаимодействующих тел	4
3. Эволюция орбит астероидов при резонансах с Юпитером	7
4. Моделирование эволюции орбит небесных тел методом сфер	8
5. Аккумуляция планет земной группы	11
6. Миграция тел в зоне планет-гигантов	17
7. Формирование астероидного и транснептунового поясов	22
8. Формирование двойных транснептуновых объектов	25
9. Формирование системы Земля-Луна	25
10. Формирование осевых вращений планет	29
11. Миграция малых тел из различных областей Солнечной системы к планетам земной группы	30
12. Изменения элементов орбит планет	37
13. Вероятности столкновений околоземных объектов с Землей и Луной и лунные кратеры	38
14. Миграция пыли в Солнечной системе и формирование зодиакального пояса	41
15. Миграция тел и пылевых частиц, выброшенных с планет земной группы и Луны	44
16. Автоматическое удаление следов космических лучей со снимков, сделанных	